
غابرييل شارْدان
المادّة المضادّة
المادّة التي تسترجع الزمن
مكتبة 262
ترجمة
د. فريد الزاهي

غابرييل شارْدان

المادة المضادة

المادة التي تسترجع الزمن

ترجمة

د. فريد الزاهي

بيانات الفهرسة أثناء النشر

QC173 .C43125 2017

Chardin, Gabriel

المادّة المضادّة: المادّة التي تسترجع الزمن / تأليف غابرييل شاردان ؛ ترجمة فريد الزاهي. - ط. 1. - أبوظبي : هيئة أبوظبي للسياحة والثقافة، كلمة، 2017.

194 ص. ؛ 11 × 18 سم.

ترجمة كتاب: L'antimatière: La matière qui remonte le temps

تدمك: 2-965-13-9948-978

1- الكيمياء الفيزيائية. 2- المواد- الخاصية الإلكترونية والكهربائية.

أ- زاهي، فريد. ب- العنوان.

يتضمن هذا الكتاب ترجمة الأصل الفرنسي:

Gabriel Chardin

L'antimatière : La matière qui remonte le temps



www.kalima.ae

ص ب 94000 أبوظبي، الإمارات العربية المتحدة، Info@kalima.ae هاتف 579 5995 2 971+



المادة المضادة

المادة التي تسترجع الزمن

الفهرس

تمهيد

يستدعي هذا الكتاب القارئ لاستكشاف العالم المرآة. إنه عالم قريب جداً من عالمنا، بحيث من العسير تمييزه عن عالم مادتنا. إن مفارقة هذا العالم الذي يبدو كمرآة لعالمنا، يكمن في طابعه البالغ الخطورة، بما أن لقاء عوالم المادة والمادة المضادة ينجُم عنه انفجار بالغ العنف ويؤدي إلى الإعدام التام لأحدهما.

لنتصورْ للحظة أن كوكبنا وجد نفسه فجأة مكوَّناً من كميات متساوية من المادة. ستصاب أرضنا مباشرة بانفجار سيكون أكثر كارثية من انفجار قنبلة نووية من نوع قنبلة الهيدروجين. فالمادة حين تلتقي بالمادة المضادة تنعدم بشكل آني في شكل تحرُّر للطاقة. والانفجار الهائل الذي ينتج عن هذه اللقاء الكارثي بين الجزيئات والجزيئات المضادة يتمدَّد في فُقاعة من النار تنتشر بسرعة قريبة من سرعة الضوء. وحين تصل قرب النظام الشمسي، على بعد ستة مليارات كيلومتر من الأرض، يظل الانفجار يسير ببضعة كيلومترات في الثانية، بقوة كافية كي تحرق سطح بلوتون بحرارته المعادلة لألف درجة.

هذا السيناريو الكارثي، واللاواقعي لحسن الحظ، يمكّننا من الوعي بأن المادة المضادة لا يمكن أن توجد في جوارنا إلا بكمّيات ضئيلة. لنتصورْ فقط أن كمية من المادة المضادة من بضعة غرامات، وبحجْم لا يتجاوز مثلاً قَلماً، فهي ستكون كافية، بانحلالها في المَادة المحيطة، أن تدكَّ مدينة كباريس. ولعل هذا الجانب من الأمور هو ما يدفع بالعسْكريين إلى قراءة المنشورات المتعلقة بالمادة المضادة بالكثير من الاهتمام.... وفعلاً، فعلى خلاف القنابل الذرية التي لا تحول إلى طاقة إلا جزءاً ضئيلاً جداً، في حدود 1 بالمائة من حجم القنبلة في الإشعاع، فإن قنبلة من المادة المضادة، إذا افترضنا معرفة صناعتها، ستكون بمرْدودية قصوى تساوي 100 بالمائة.

بعيداً عن هذه الأحلام الحربية، لا زال العالِم يسعى اليوم إلى إعطاء أجوبة على الأسئلة التالية: هلَ يحتوي الكون على المادة قدْر المادة المضادة؟ أين توارت كل المادة المضادة التي كانت موجودة منذ فجْر الكون؟ لماذا سعت الطبيعة إلى خلق عالِم مرآةٍ يتألق اليوم بغيابه؟ لمحاولة الإجابة على هذه الأسئلة سنسعى أولاً إلى فهم كيفية ظهور مفهوم المادة المضادة في غمرة اكتشاف بنية الجزيْئات. ومن خلال رسم تاريخ الكون وشبابه الصاخب، سنسعى

إلى فهم الدور، الذي صار هامشياً أكثر فأكثر مع هدوء الكون، الذي استطاعت المادة المضادة أن تلعبه. وسوف نسير بعد ذلك إلى استكشاف عوالم المادة المضادة، منطلقين من النظام الشمسي لنصْعد نحو المجرّات والبنيات الكبرى للكون.

بعدها، سوف نسعى إلى فهم الآليات التي تقود إلى موت المادة وإلى احتراقها النهائي بدراسة سيْرورتيْن: موْت البروتون وتبخر الثقوب السوداء، الذي ينزَع أي معنى عن مفهوم المادة، ومن ثمة المادة المضادة، والذي قد يتحكَّم في المستقبل البعيد للكون. إن الإشارات التي ستمنحها لنا دراسة الثقوب السوداء عن المتهم الممكن للاتوازي بين المادة والمادة المضادة ستقودنا إلى الدفاع عن أطروحة مدهشة، تتعلق بكون النسبية العامة يمكن أن تتنبأ بجاذبية تنابُذية للمادة المضادة. فالرصد الذي تم منذ 1998 لتزايد توسع الكون، المنسوب لـ«طاقة سوداء» غير معروفة، يقودنا إلى أن نأخذ مأخذ الجد فرضية كتلك، بالرغم مما يشوبها من مشكلات جمة. إن ميدان الكسمولوجيا في تطور مطرد، ومئات المقالات تهتم بهذا المكون التنابذي الغريب في الكون.

يتطلَّب التقدم في فهمنا للمادة المضادة أخيراً التمكُّن

من صناعتها كما من صناعة الذرات المضادة ذات الطاقة الضئيلة، وسوف نصف المجهودات التي تمت منذ بداية 1990 في المركز الأوروبي للدراسات الذرية CERN قصد إنتاج ذرات الهيدروجين المضاد الأولى. كما سنصف الطريق الطويل نحو صناعة الذرات المضادة التي تكون بالغة البرودة بحيث يمكن الاحتفاظ بها في شِرَاك مغناطيسية. ومن هذه الدراسة المتأنية قد يستطيع الإنسان أن يعثر على الطريقة التي بها سيستعمل عالم المادة المضادة كي يتحكم أفضل في الكون.

الباب الأول

نحو اكْتشاف العالَم المرآة

عالم مرآة

لقد قام السير أرثور شوسْتر Arthur Schuster، في نهاية القرن التاسع عشر، حباً في التوازي، بتصور عالم مرآة من المادة المضادة، تملك فيه الذرات خصائص جد متعارضة (لكن بأي معنى كان هذا التعارض؟) مع خصائص الذرات في المادة العادية. إنه حدْس عبقري، لكن لا مستقبَل له أمام غياب البلْورة الصورية التي يمكن أن تعضِّد بناءه. فالبناء الفعلي للمادة المضادة سوف ينتظر ثلاثين سنة كي تسعى الميكانيكا الكوانْتية إلى الزواج بالنسبية الخاصة.

في الوقت الذي تصف فيه الميكانيكا الكلاسيكية لنيوتن أشياء يمكن أن تنتقل بسرعة كبيرة إلى حدّ ما، تعترف الميكانيكا النسبية بالمقابل بأنْ ليس من الممكن السير بسرعة أكبر من سرعة الضوء. إن ميكانيكا نيوتن ليست إذاً سوى مُقاربة للميكانيكا النسبية، أي ميكانيكا السرعة الضعيفة، أمام سرعة الضوء. بالشكل نفسه، فإن الميكانيكا الكلاسيكية لنيوتن، أي ميكانيكا اليقينيّات، ليست سوى مقاربة للميكانيكا الكوانتية، أي ميكانيكا

الاحتمالات. إذا كانت الأشياء في ميكانيكا نيوتن تملك سرعة وموقعاً محدَّديْن بدقة، فإن الميكانيكا الكوانتية تعترف بأن ذلك اليقين ليس مطلقاً، بل قد يكون مستحيلاً تماماً الحديث في الآن نفسه عن سرعة جزيْء وعن موْقعه.

في عشرينيات القرن الماضي، كان الفيزيائي النمساوي إرڤين شرودنغر Erwin Schrödinger قد بنى معادلة تحمل الآن اسمه، وهي تصف سلوك الأنظمة الكوانتية باستلهام معادلات الميكانيكا الكلاسيكية التي بناها نيوتن. والنسبية التي كان أينشتاين قد بلْورها منذ وقت، أي في 1905، كانت قد صارت إلى حدٍّ ما مقْبولة. من الطبيعي إذاً، في نهاية العشرينيات، أن ينطلق الفيزيائي الإنجليزي بول أدريان موريس ديراك Erwin Schrödinger في البحث عن معادلة تتنبأ بسلوك الإلكترونات وتكون كوانتية، بالارتكاز على معادلات النسبية الخاصة بدلاً من ميكانيكا نيوتن. فللحفاظ على انسجام البناء الفيزيائي، كان من المستعجل السعي إلى بناء معادلة تتحكم في الأنظمة الكوانتية والنسبية في الآن نفسه. وبعد فترة من التفكير، توصّل ديراك سنة 1928 إلى تحرير معادلة كان لها شكل معادلة شرودينغر Schrödinger نفسه، غير أنه انتبه إلى أن من الممكن في كل حل من الطاقة الإيجابية تقدمه له

معادلته، أن نربط به حل طاقة سلبية[1].

كان ديراك Dirac، مثله مثل شوستر، يوجه اهتمامَه البحث في التوازي. ولأن هذا العالم المرآة تتوقَّعه معادلاته، فهو يلزم أن يوجد في مكان ما ويملك أهمية تُضاهي عالم المادة. ولَقد صرح خلال الحفل الذي تُوِّج فيه بجائزة نوبل: «إذا نحن قَبلنا بنظرة التوازي الكامل بين الشحنات الإيجابية للطبيعة، فعلينا أن نعتبر أن الأرض (وربما مُجمل النظام الشمسي) تتضمَّن في الغالب، ومن باب الصدفة، إلكترونات سلبية وبروتونات إيجابية. ومن الممكن تماماً أن تنقلب الوضعية في بعض النجوم، التي تتكون أساساً من بّوزيترونات وبروتونات سلبية. من الممكن وجود نجوم من كل الأنواع. وصنفا النجوم سيكون لهما تماماً الظل، الشبح المضيء، ولن يوجد ثمة أي سبيل للتمييز بينهما باستعمال المناهج الفلكية الحالية».

يطرح ديراك هنا سؤالَيْن أساسين: إذا كانت النظرية لا تعرف التمييز بين المادة والمادة المضادة، فلا بد أن ثمة عالماً من المادة المضادة له أهمية عالمنا. لكن أين يا تُراه يختفي في هذه الحالة؟ وكيف يمكن «المناقشة» مع العوالم البعيدة لنعرف قبلاً إذا كان اللقاء بين مبعوثيْن من العالميْن سيؤدي إلى عناق أخوي أو إلى انفجار هائل.

يعتبر ديراك أن المشكل الأساس الذي كانت تطرحه حلول الطاقة السلبية كان مرتبطاً بعدم استقرار الفراغ الذي يؤدي إليه وجودُها، فهذه المعادلات تعطي فعلاً الانطباع بأننا من غير توفير الطاقة، أي بشكل مجاني كليةً، يمكننا إنتاج زوْج من الجزيْئات، أحدهما ذو طاقة إيجابية، والآخر ذو طاقة سلبية مناقضة وكبيرة، كما نريد لها. بعبارة أخرى، لا شيء يمنع الفراغ، ذا الطاقة المنْعدمة، أن يكون غير مستقرّ في الوقت الذي نعرف فيه في الواقع أننا لا نملك شيئاً بلا شيء، وأن الفراغ يظل مطلقاً فارغاً من غير مساعدة خارجية.

لقد تمَّ استقبال نظرية ديراك بنوع من الحيطة، بل أحياناً، كما هو الحال في فرنسا، بمعارضة كبيرة. ولكي يجيب ديراك على النقْد الذي وُجِّه لعدم الاستقرار المتصل بمعادلته، تصور أن حلول الطاقة السلبية كانت في الواقع تحتلها جزيْئات، وأنه لرصد إحدى تلك الجزيئات ذات الطاقة السلبية، من اللازم البدْء أولاً بعزل جُزيْء مستقر في إحدى حالات الطاقة السلبية هذه. وهكذا فإن الملاحِظ سوف يعتقد أنه يرى جزيئيْن في الوقت الذي لن يلاحظ فيه في الواقع إلا الجزيْء المقتلع، الذي يمر إلى المجال الشاسع لانهائياً للطاقات الإيجابية، و«الثقب» الذي تتْركه

وراءها. هذا التأويل الذي يُسمى «بحْر ديراك» لوصف بحر مستويات الطاقة السلبية الممتلئة، له سلبية تتمثل في أنه لا يعير الوضعية نفسها لجزيْء تبعاً لأنه طاقة إيجابية أو سلبية. ولهذا فهو غير مستعملٍ اليوم.

في العشرينيات من القرن الماضي، كان عالمُ الجزيْئات في بداية استكشافه ويتحدَّد في المادة العادية، بحيث يبدو قابلاً للبناء انطلاقاً من البروتونات وحدها. وتوخِّياً للاقتصاد، وحتى لا يدمج ديراك جزيْئات جديدة غير مفيدة، بحث عن الاستفادة من هذا اللاتوازي الذي يأتي به نموذج «بحْره» وأطلق الفرضية القائلة بأن جزيئات الطاقة السلبية، أي الثقوب، كانت هي البروتونات. بيد أن الرياضي هرمان فايل Hermann Weyl لم يلْبث أن لاحظ أن معادلة ديراك، بما أنها تتناول بشكل متوازٍ تماماً حلول الطاقة الإيجابية والسلبية، فمن الضروري أن يكون لها أحجام متساوية بشكل صارم.

أربع سنوات بعد ذلك، أي في سنة 1932، قام الفيزيائي الأمريكي كارل أندرسون Carl Anderson بالبرهنة بشكل باهر على هذه الفرضية حين لاحظ في الإشعاع الكوني جزيْئاً كان له الحجم نفسه للإلكترون، لكن له شُحنة معاكسة. وهكذا صرنا نلاحظ أن البوزيترون وهو يتوقف

في المادة، يتفكك إلى فوتونيْن سوف نرى أنهما يُعتَبران هما جزيئاتهما المضادة الخاصة. وهكذا لم يلبث اكتشاف أندرسون أن تأكد، لا باستعمال الإشعاع الكوني، وإنما الآن بالإنتاج المباشر للمادة المضادة، بفضل تفجير الأنْوية بفضل الإشعاع غاما لإنتاج أزواج من الإلكترون-البوزيترون، وهو نسميه اليوم رد الفعل المعاكس للإبْطال. بالإضافة إلى ذلك، وبما أن التجارب تبرز لزوم طاقة إيجابية لخلق الزوج جزيْء-جزيْء مضادة فإن استقرار الفراغ، الذي يكون مهدَّداً للحظة، يتم استعادته.

كان اكتشاف البوزيترون سيؤدي إلى فرضية جديدة تتعلق بوجود جزيْء مضاد متوائم مع كل جزيْء، كما تتعلق بفرضية عالم مرآة لم يتم رصْده من قبل. وبالفعل، فالبوزيترون ما إن تمَّ التعرف عليه حتى كبُرت الرغبة في تعميم مفهوم الجزيْء المضاد والسعي إلى رصد البروتون المضاد والنوترون المضاد، وهو الأمر الذي كان سيؤدي إلى استعادة توازي العالم الصغير للجزيْئات الذي كان معروفاً آنذاك. فلو كان للإلكترون جزيئُه المضاد فسيتبع ذلك حتماً البروتون والنّوترون. بيد أن البروتون والنوترون أثقل من الإلكترون. وصناعة بروتون مضاد أو نوترون مضاد يتطلب حوالي 1800 مرة من الطاقة أكثر

من صناعة بوزيترون، وهو ما يفسر أنه كان من اللازم انتظار ثلاثٍ وعشرين سنة بعد اكتشاف البوزيترون، كي يكتشف إميليو سوغري Emilio Segré وأوين شامبرلان Owen Chamberlain وكلايد فييغران Clyde Wiegand وطوم يبسيلانتيس Tom Ypsilantis، سنة 1955، البروتون المضاد، ثم في السنة التالية النوترون المضاد. وفي الحالين معاً،تم الاكتشاف لا برصْد الإشعاع الكوني وإنما باستعمال مسرِّع للجزيئات (يسمّى بيفارتون بيركلي Bevatron de Berkeley) تم بناؤه بهدف خلق البروتون المضاد.

بعد اكتشافيْن متتابعين، كنا نعتقد أن الأمر سيقف عند هذا الحد بما أن الجزيْئات الأساس الثلاثة التي انطلاقاً منها يمكن بناء كامل للمادة العادية قد وجدت كل واحدة منها الآن جزيئها المضاد. لكن، خلال الثلاثين سنة التي مرت بين اكتشاف البوزيترون والانتهاء من بناء مسرع الجزيئات القوي لصناعة البروتون المضاد، تم اكتشاف جزيْئات أخرى في الإشعاع الكوني، كالمويون muon أو الكاوون kaon، وهي جزيئات غير مستقرة أُطلِقت عليها أسماء أخرى مختلفة عن تلك التي نعرفها بها اليوم. وفي الستينيات، ومع تطور طاقة مُسرِّعات الجزيئات، سوف يتم اكتشاف حديقة حيوانات حقيقية من الجزيْئات، سوف تجعلنا ندرك

أن فيزياء الجزيئات كانت بالغة التعقُّد، ربما تقاس بتعقُّد الكيمياء بكثرة تركيباتها الكيميائية. لكن خلف هذا التعقّد، الذي سنرى أنه ظاهر فقط، ثمة قاعدة بسيطة كانت تحظى بالاحترام: فبخصوص كل جزيْئة كان يتم رصد مضادّها، التي كانت تتمتع بقدر مساوٍ من الخصائص التي يتمتع بها الجُزيْء. وهكذا لا يوجد اليوم أي نموذج من الجزيْئات، حتى الجزيء غير المستقر، لا يملك جزيْئه المضاد. يبدو الأمر كما لو أن الطبيعة تقوم بعملها مرتيْن.

كان الفيزيائي الدانماركي دانييل غرهارت لودرز danois Gerhart Lüders هو الذي قام بتدقيق الوضعية بتوضيح كيف أن عالم المادة والعالم المرآة للمادة المضادة عليهما أن يكونا بالغيْ التشابه، وكل نظرية فيزيائية «معقولة» عليها بالفعل أن تحترم التوازي CPT. وقبل أن نلخّص هذه النظرية، التي تسمى «CPT»، التي برهن عليها لودرز، لنبدأ بوصف العمليات الثلاث التي تتدخل في هذه النظرية.

قلبُ الشّحْنة

العملية الأولى التي نسميها C، يشكل فيها هذا الحرف اللاتيني بداية كلمة «charge» أي الشّحنة، بالنظر إلى قلب

دور الشحنات بين الجزيْئة والجزيْئة المضادة حين نطبق التحويل. لننطلق مثلاً من تجربة واقعية تتعلق باصطدام بين الجزيئات (ولا شيء يمنع أن نستعمل أيضاً جزيئات مضادة)[2]. ولنسجلْ بدقة سرعات ووضعيات الجزيئات التي تتدخل على طول التجربة. والآن لكي نطبق التحويل C على هذه التجربة، سوف نبني تجربة خيالية: ففي كل مرة نصادف فيها جزيْئة نعوّضها بجزيئتها المضادة، بأن نفرض عليها أن تتبع بالضبط المسار نفسه الذي كان للجزيْئة الأصْل. وإذا ما وجدنا نفسنا أمام جزيئات مضادة فإننا سنعوّضها، في الشروط نفسها، بجزيئاتِها المضادة، أي بالجزيْئات المقابلة لها. فإذا نحن مثلاً نظَرنا إلى تصادم بين بروتون ونوترون مضاد، فإن التحول C سيصف لنا التصادم نفسه، لكن هذه المرة بين بروتون مضاد ونوترون مضاد، أي نوترون.

وما إن يتم إنجاز هذه العملية، لا شيء يفصح بأن التجربة الجديدة يمكن أن توجد في الطبيعة. لنطرح إذاً السؤال التالي: إذا ما نحن انطلقنا من وضعية نعرف أنها متاحة في الطبيعة وأننا طبقنا التحول C (بتعويض كل جزيْء بجزيئه المضاد وبالحفاظ على المسار نفسه)، فهل الوضعية الجديدة كما تمّ بناؤها مسموح بها في الطبيعة؟ إذا

كان الجواب بنعم، سنقول بأن التجربة تحترم التوازي C، وفي الحالة المضادة بأنها تخرقها.

خلف المِرآة

علينا ألا نقدّم الآن الجواب على السؤال المتعلق بإذا ما كانت الطبيعة تحترم أم لا التوازي C ولنسْعَ إلى تحديد التحول (P, CP هنا اختصار لـ«التكافؤ»). وعملية P هي عملية «المرآة» مع اختلاف بسيط جداً لن نعيره هنا اهتماماً. وحتى نعرف ما نعْنيه بذلك، لنتعاملْ بالطريقة نفسها التي تعاملنا بها مع التحول C. إن تطبيق التحول P على تجربة واقعية يتمثل الآن في أن ننجز بالفكْر التجربة كما ستتم رؤيتها في مرآة. لنسجِّلْ أن الجزيْء، خلافاً للتحول C، الذي يتبادل أدوار الجزيئات والجزيئات المضادة، يظل جزيْئاً تحت فعل التحول P (والأمر نفسه بخصوص جزيْء مضاد)، وأن ما يتم تغييره في العملية P هي مواقع الجزيْئات لا طبيعتُها. وبالشكل نفسه في العملية C، يمكننا الآن أن نطرح قضية معرفة أننا إذا ما انطلقنا من تجربة مسموح بها في الطبيعة، فإن الوضعية كما تتم رؤيتها في المرآة تشكل أيضاً وضعية مسموحاً بها في الطبيعة.

إننا معتادون على النظر في المرآة واعتبار أن ما نراه فيها

وضعية «واقعية»، بحيث إن الأمر قد يبدو لنا ضرباً من البَلَه، بل هكذا أحياناً كان الفيزيائيون يقومون بردّة الفعل حين طرح المنظّران الشابان الصينيان تسونغ داو لي Tsung Dao Lee وشين نينغ يانغ Chen Ning Yang قضية معرفة إذا ما كانت قوانين الطبيعة تحترم توازي المرآة P. وقد يبدو لنا من «البدهي» أننا إذا رأينا تَناظُماً من الأشياء في مرآة، فيمكننا إنْجاز الوضعية نفسها في الواقع. ألا يبدو من البدهي مثلاً أن الصيغة الفرنسية لسيارة مقودها في اليسار، إذا كانت تشتغل بطريقة ما، والصيغة «الإنجليزية» ذات المقود في اليمين، التي سنبْنيها بتعويض كل قطعة بنظيرتها المعكوسة في المرآة (حذار، لا مجال للغش باستعمال القطع نفسها) ستشتغل تماماً بالطريقة نفسها التي تشتغل بها الصيغة الفرنسية؟

العوْدة في مَسير الزَّمن

قبل أن نقدم جواباً لهذا السؤال الثاني، لنمرّ الآن إلى التحول الثالث، أي التحول T (و T هنا اختصار لكلمة الزمن). إن تطبيق التحول T على تجربة ما يعني تصوير التجربة ثم عرْض الفيلم معكوساً. وهكذا نحصل على تجربة جديدة لا نعرف من جَديد وقبليّاً إن كانت قابلة

للإنجاز في الطبيعة.

كل واحد منا استمتع بالوضْعيات المضْحكة الناجمة عن فيلم معروض بالمقلوب: فركام الصحون الذي كان قد تهشّم على الأرض تجتمع أشلاؤه ليصعد فوق الطاولة التي منها سقط، وأنبوب معجون الأسنان الذي ضغط عليه صبي بقوة يسترجع المعجون ويمتلئ به ضدًّا على كل منطق. وبشكل آخر، إذا التقطت لنا كاميرا صورة في كل دقيقة فإننا سنرى نفسنا نشيخ بشكل واضح، في الوقت الذي سوف يبيِّن الفيلم المعروض بالمقلوب كيف أننا نعود لشبابنا ثم لصبانا.

في حالات الحياة العادية، نحن نعلم في أي اتجاه يُعرض شريط حياتنا، وليس لنا أدنى شك عن كون الزمن يجري في اتجاه وحيد، وأن لا مجال لنا للعودة للوراء لمحْو الأخطاء السابقة لوجودنا. لكن ما الأمر في الإطار المثالي للتجارب الفيزيائية؟ إذا نحن شاهدنا تجربة من فيزياء الجزيْئات، تمثل ما نعتبره اليوم جوهر السيرورات المكْروسكوبية، فهل نستطيع تحديد إذا ما كان الفيلم يُعرَض في الاتجاه الصحيح أم بالمقلوب؟

المُبرَهنة العَجيبة CPT

قبل الإجابة أخيراً على هذا السؤال، لنعدْ إلى مُبرْهَنة CPT التي كان قد اكتشفها لودرز. تؤكد هذه النظرية أننا إذا صوَّرنا الانعكاس في مرآة (التحول P) لعالم حيث تُعوَّض الجزيئات بالجزيئات المضادة (التحول C)، فإن هذا الفيلم الذي يُعرض بالمقلوب (التحول T) يلزم أن يعرِض سيرورات تكون ممْكنة أيضاً في عالم مادّتنا. والفرضيات التي تسمح بالبرهنة على نظرية CPT بالغة العمومية، وأغلب الفيزيائيّين يُبْدون حذرهم وتحفظهم حالما يتم تقديم نظرية تخرق التوازي الشهير، باعتباره نتاجاً للتحولات الثلاثة، P، C و T. لنسجِّلْ أن الأمر لا يتعلق إلا بنظرية، وأنها لا تخضع للبرهنة إلا بفرضيات معينة. وعموماً فإن كل الظواهر الفيزيائية يمكن أن تُختزل إلى أربعة أنماط من التفاعلات: التفاعل الكهرُمغناطيسي، تفاعل الحقول الكهربائية والمغناطيسية التي نعرفها، والتفاعل القوي، ذي المدى القصير الذي يتحكم في التفاعلات الذرية. والتفاعل الضعيف المسؤول عن بعض التفككات كتفكك النّوترون، وأخيراً التفاعل الجاذبي، البدْهي بالثقل الذي يفرضه طول اليوم، ولكنه يظل من دون شك الأكثر إلغازاً من الناحية النظرية. وهكذا، إذا كنا أقرب إلى التأكُّد بأن النظرية محقّقة

بخصوص القوى الكهْرُمغناطيسية، القوية والضعيفة، فإننا لا نعرف البرهنة على نظرية CPT (ولنا الحق في افتراض أنّ النظرية ليست دقيقة بما يكفي) في حال الجاذبية[3].

إن إحدى النتائج المهمة لهذه المُبرهَنة تتصل بالعلاقة بين المادّة والمادة المضادة. فالنظرية تفترض أن ثمة عالماً من المادة المضادّة يقابل عالم مادتنا، وهو شبيه شبهاً كبيراً بعالمنا، بما أن كل جزيْء مثلاً يلزم أن يكون له الحجْم نفسُه الذي للجزيْء المرتبط به. إضافة إلى ذلك فإن الشحنة الكهربائية لجزيْء مضاد تملك القيمة المعاكسة.

إلى أي حدّ تحترم الطبيعة الأنظمة الثلاثة، C و P و T، منظوراً إليه بشكل فردي؟ حين برهن لودرز على نظريته في بداية الخمسينيات، كان معظم الفيزيائيين يتكهّنون بأن الطبيعة كانت بحيث توجد فيها قطع المركَّب C و P و T، كل واحد متوازياً بشكل منعزل. أليس من البدهي مثلاً أن التوازي P تحترمه قوانين الطبيعة، وأن انعكاس عالمنا في مرآة يوضح وضعيات قابلة للتحقيق في المُمارسة.

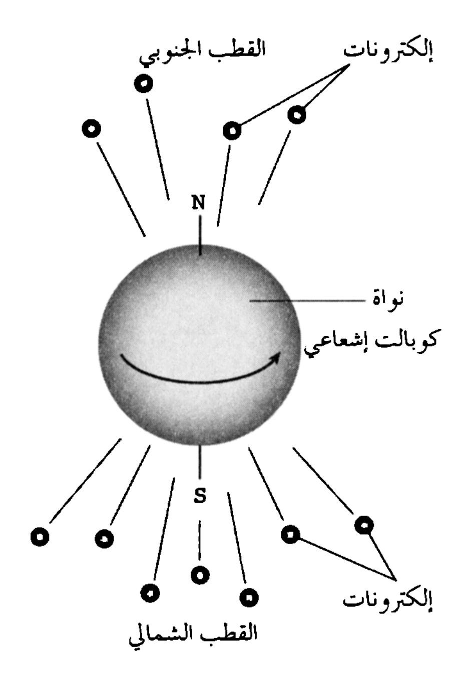
العالم يفضّل اليُسرى

في سنة 1956، كان ثمة لغز يحير الفيزيائيّين. ففعلاً كان يبدو أن ثمة جزيئين، كانا يسمّيان حينها «ثيتا»

و«طو» (وهما يسميّان اليوم «كاوون»)، ولهما الحجم نفسه والشحنة نفسها ومدة الحياة نفسها. وحين يكون جزيئان لهما هذا القدر الفائق من التشابه، يكون من الفضول الافتراض بأننا أمام الجزيْء نفسه. والمشكل هو أن الأمر لو كان كذلك، فإن ذلك الجزيْء سيتفكك تارة إلى جزيئيْن يسميان البيدقين، وتارة إلى ثلاثة بيادق وسوف يخرق ذلك التوازي المرآة.

لقد أقدم الفيزيائيان الصينيان لي ويانغ على هتْك المحرَّم. فقد برهنا فعلاً على أننا لم نكن نعرف إن كانت الطبيعة تحترم التوازي المرآة في حال تفكك الكاوونات. بل إنهما سارا إلى أبعد من ذلك، إذ اقترحا تجارب تمكّن من التحقق من كون ذلك التحوّل قد تمَّ خرْقه فعلاً في حال التفاعل الضعيف الذي يتحكم في تفكُّك الكاوونات.

كما قام بعض التجريبيين المِقْدامين، ومن ضمنهم فيزيائية نووية ذات أصل صيني، السيدة شين شيونغ وو Chien-Shiung Wu برفع التحدي؛ فبالرغم من عدم تصديق الغالبية العظمى من الزملاء، كانت هذه الفيزيائية أول من تحقَّق من أننا بإمكاننا تمييز عالمنا عن صورته في المرآة، وهو ما يعني أننا يمكننا تمييز اليمين من اليسار بشكل مطلق. وهكذا، إذا كانت التفاعلات الضعيفة



تجربة السيدة وو

لقد مكّنت تجربة السيدة وبشكل مطلق من تحديد اليمين واليسار. فبوضع نواة من الكوبالت ذي الإشعاع الذري في حقل مغناطيسي، نلاحظ أن ثمة إلكتروناً يتم بثّه بالأحرى من قِبل القطب الجنوبي للكوبالت لا من قطبه الشمالي. لنأخُذْ الآن بوصلة. تسمح تجربة السيدة وو من تحديد أين هو القطب الشمالي فيها. ولنضعْ البوصلة فوق خيط كهربائي تسري فيه شحنة بحيث تتجه الإلكترونات نحوك: فإن القطب الشمالي للعقرب يستدير نحو اليسار.

المصدر: مأخوذ عن مارتن غاردنر، *العالم الذي يشتغل باليدين*، منشورات لوسوي، 2000

تدخل في صناعة سيارة، فإن صيغتها «الإنجليزية»، عكس ما يمكن أن يصل إليه حدسك، لن تشتغل مثلها مثل الصيغة «الفرنسية» منظوراً إليها في مرآة. بعبارة أخرى، فإن خرق التكافؤ يسمح بأن نحدِّد بشكل مطلق اليمين واليسار.

هذه النتيجة التجريبية لها أثرُ انفجار على العالم الصغير للفيزيائيين. فكما هو الحال في الغالب، حين يفاجئنا حدث غير متوقَّع، كان يتم البحث عن أيِّ تشكيلة من التحولات الثلاثة C و P و T التي كانت توازيات تحترمها الطبيعة.

لقد أبرز الفيزيائيان الروسيان ليف لاندو Lev Landau وليف أوكون في العام الذي يليه أننا كنا بالغي السذاجة حين افترضنا أن قطعتي المركَّب C و P هي الموازية هذه، والأخرى (الرسم 1-أ). بيد أن التوازي الطبيعي، الذي كان يلزم أن يحترم قطعاً كان نتاج التحوُّليْن C و P. وفعلاً، كما قال لاندو وأكون، فكتلة التحوليْن CP هي المتوازية (الرسم 1-ب) وهي التي تمرّر المادة إلى المادة المضادة. إذا كانت مُبرهنة CPT متحقق منها فإن هذا التوازي CP ليس سوى التوازي T لقلب الزمن. إذا كانت المادة والمادة المضادة لهما هذا القدْر من الشبه، فذلك لأن الأمر يتعلق في الواقع بالشيء نفسه، باستثناء أن المادة المضادة

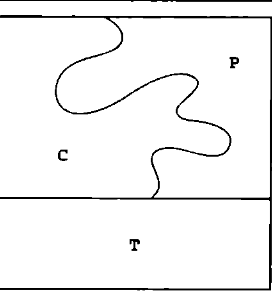
1a

C

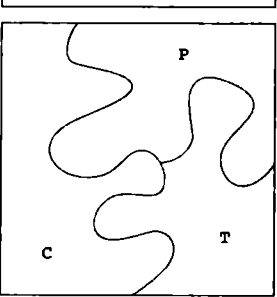
P

T

1b



1c

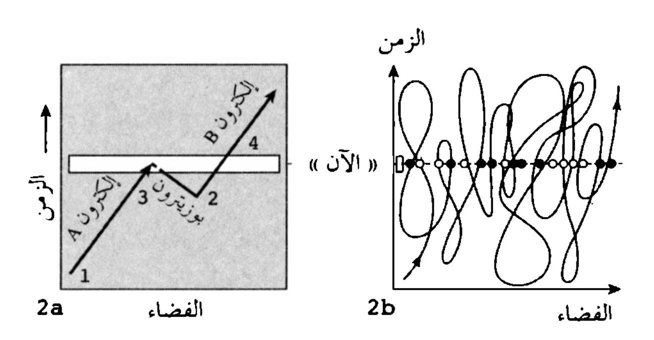


الشكل 1: مبرهنة CPT العجيبة
قبل اكتشاف خرْق التكافؤ في 1956، كان الفيزيائيون قد راهنوا على أن مكونات C و P و T كانت متوازية بشكل منفرد كما في الشكل 1a. إن خرق التكافؤ في التفاعلات الضعيفة يقودها إلى الشكل 1b حيث، إذا لم تكن الكتلتان C و P غير متوازيتين، فإن التوازيْن CP و T لا يزالان كذلك. وبعد اكتشاف خرْق CP سنة 1964، كان من اللازم الاعتراف بأن مكونات المبرهنة كانت اشدّ تعقّداً، تبعاً للنموذج في الشكل 1c.
المصدر: مأخوذاً عن:
Martin Gardner, L'Univers ambidextre, Editions du Seuil, « Points Science », 2000.

هي المادة التي تصعد الزمن. ففي معادلة ديراك يعني استبدال علامة الطاقة تغيير وجهة الزمن حيث يبدو فيها البوزترون كإلكترون يصعد الزمن (الشكل 2-أ)، بحيث إن الفيزيائي جون ويلر John Wheeler سار إلى

حدّ اقتراح فكرة أنه قد لا يوجد ثمة في العالم إلا إلكترون واحد (الشكل 2–ب) يبدو ذهابه وإيابه في الفضاء الزمن مثل مجموع إلكترونات وبيوزترونات الكون.

لنسجلْ أيضاً أن مُبرْهنة CPT إذا ما تم التحقق منها، فإن اختلافاً في السلوك بين المادة والمادة المضادة (أي خرْق CP) يتم ربطه بسهم الزمن (أي خرق T)، وهو مشكل كبير لم يتمَّ حله في الفيزياء.



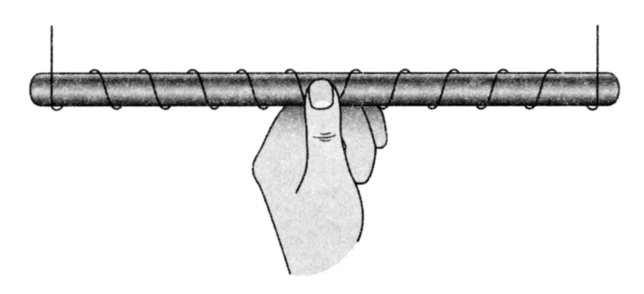
الشكل 2: إلكترون يصعد الزمن

يمكننا أن نتصور البوزيترون كإلكترون يصعد الزمن. وإبطال إلكترون وبوزيترون (في النقطة 3) يبدو إذاً كصدمة في مسار إلكترون يصعد الزمن (الشكل2أ). هذا التشخيص قاد الفيزيائي جون ويلر إلى افتراض أنه قد لا يوجد ثمة سوى إلكترون واحد في الكون تبدو انكسارات مساره مثل الإلكترونات وبوزيترونات الكون (الشكل 2ب).

المصدر: مأخوذ عن: Martin Gardner, L'Univers ambidextre, Editions du Seuil, « Points Science », 2000.

لنحاول اقتراح نموذجٍ يوضح لماذا كان يتوقع لاندو وأوكون أن يُظهر التوازيِ مسار إلكترون وبوزيترون في الفضاء الزمن، لا في الفضاء العادي. نحن نرى في هذا الرسم البياني أن البوزيترون يسبر في «الاتجاه المعاكس» لإلكترون في الفضاء الزمن. وهو ما يعني أن الإلكترون إذا كان له نوع من الدّوران الداخلي، فإن البوزيترون حين ينظر إليه الملاحظ بالمعكوس سيكشف عن حركة دَوران معاكسة. وقد أوضح العالم الرياضي شارل هينتون Charles Hinton هذه الفكرة بنموذج ذي بُعْد نظر باهر منذ نهاية القرن التاسع عشر. فقد كان شارل هينتون يتمثل الشّحنات الإيجابية والسلبية مثل التدوير في الاتجاه المعاكس لحبلٍ حول مسطرة (الرسم البياني 3). فطالما أن اليد تفرقَ بين التدويريْن المُتعاكسين، تظل المسطرة محْبوسة. لكن ما إن نُزيل اليد، فإن التدْويريْن يمكن أن يبطلا، ونكتشف أن الحبل ليس مدوّرا ممّا يحرر المسطرة. بهذه النظرة الهندسية للجزيْئات وللجزيْئات المضادة، فإن التجربة التي أنجزتها السيدة «وو» لا تمكّن من النقاش مع شخص من خارج الأرض لكي نفسر له ما هو اليمين وما هو اليسار، إذا لم نكن نعرف من البدء أن العالم مكوَّن من المادة والمادة المضادة.

بهذه الثقة المستعادة في التوازي بين المادة والمادة المضادة، تم استقبال اكتشاف خرق CP بالكثير من الدهشة والاستغراب والحذر سنة 1964. بل إن الفيزيائيّين المكتشِفين أنفسهم، الأمريكيين جيمس كرونين James Cronin وجيمس كريستنسون James Christenson وفال فيتش Val Fitch والفرنسي روني تورلاي René Turlay، قد تحقَّقوا من نتيجتهم لمدة ستة أشهر قبل أن يعلنوا عن اكتشافهم. وقد صارت التوازيات C وP وT، خلافاً لأحكامها المسبقة تبدو متصلة اتصالاً وثيقاً تبعاً لخطاطة التداخل في الرسم 1-ج.



الشكل 3: حبل شارل هينتون

لقد تصور شارل هينتون، في نموذج بعيد النظر وباهر، الجزيْئات والجزيْئات المضادة كتدويريْن متعاكسين يبطل أحدهما الآخر إذا ما سمحنا للتدويريْن بالالتقاء.

المصدر: مأخوذاً عن: Martin Gardner, L'Univers ambidextre, Editions du Seuil, « Points Science », 2000.

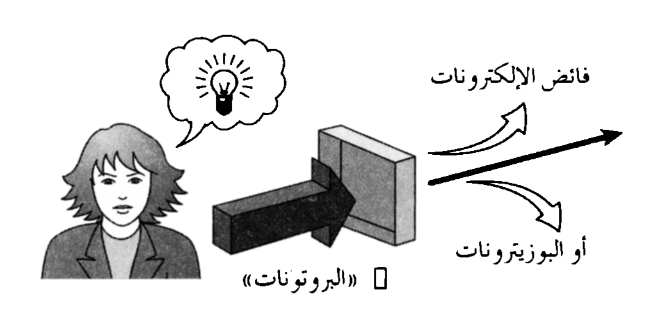
مشكل أوزما

لفهم أهمية هذا الاكتشاف، علينا أن ندرك أنه يمكّن من الإجابة على مشكل أوزْما. وهذا الاسم مشتق من اسم أحد قادة العوالم الأسطورية هو «أوز»، الذي ابتكره فرانك بوم، المُحاط بحواجز منيعة. ومشروع أوزما، الذي يعتبر محاولة للعثور على أشكال أخرى من الذكاء في شساعة الكون، انبثق في الستينيات حين تمَّ اتخاذ القرار بتوجيه الأذنين الهائلتين للراديوتلسكوب «غرين بانك» في ولاية فرجينيا، نحو نجوم مختلفة لاستكشاف رسائل صوتية آتية من عوالم أخرى مأهولة. ونحن اليوم نستعمل باستمرار الاسم المختصر SETI (البحث عن الذكاء خارج الأرض) لهذا النوع من البحث الذي عرف اهتماماً وحماساً كبيرْين في السنوات الأخيرة. وبعد إنذار خائب يتعلق بإشارات منتظمة أطلقتها «بولزار»، وهي عبارة عن مصابيح كهرُمغناطيسية لا تملك أي شيء متحضِّر، صارت الأبحاث تتجه اليوم نحو رسائل أكثر تطوراً.

يتعلق مشكل أوزْما، في حال جواب صادر عن النجوم، بمعرفة إن كان الحوار مع الكائنات الفضائية سيتمّ عبر الذبذبات الإذاعية حتى نتمكّن، قبل مصافحتهم، من تحديد هل هم يتكوّنون من المادة المضادة أم من المادة.

ففي الحال الأول، ومتى ما افترضنا أنهم لم يتفكّكوا قبل أن يقتربوا منا، فإن اللقاء سيكون انفجارياً لا محالة. وبما أن خرْق توازي المرآة P، لا يمكنه لوحده أن يسمح لنا بالتحقق قبل اللقاء المحتوم، فإن خرق CP يجعل ممكناً الحوار المخلِّص (الشكل 4). ولكي نتمكن من تحديد إن كان الكائن الفضائي مكوَّنا أم لا من المادة، يكفي أن نقترح عليه الوصفة التالية:

- القيام بتفجير هدف ما، بروتونات عالمك (التي



الشكل 4: حوار مع كائن فضائي

إن خرق التوازي CP (أي التوازي بين المادة والمادة المضادة) يمكّن، من غير تماس مباشر وبالحوار عبر إشارة إذاعية، من تحديد ما إذا كان كائن فضائي مكوَّناً من المادة أم من المادة المضادة. ويكفي لذلك من القيام بتصادُم طاقي من البروتونات على هدف من المادة (أو المادة المضادة)، والنظر إذا ما كانت حصائل تفكك الجزيْء المحايد، الذي يكون له تقريباً نصف حجم البروتون، تفصح عن زيادة في «البوزيترونات» (كما هو الحال في عالمنا) أم من «الإلكترونات».

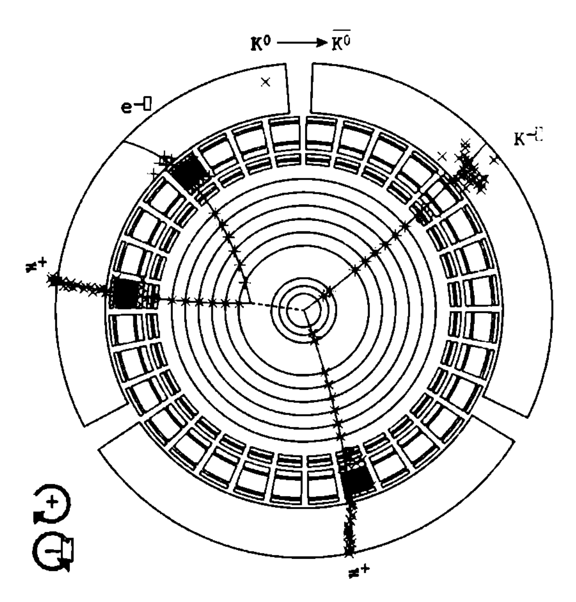
ستكون في الواقع عبارة عن بروتونات مضادة إذا كنت تنتمي لعالم المادة المضادة).

- الأجزاء المتعدّدة التي تنبثق من الهدف، وألا يتم الاحتفاظ إلا بالجزيْئات المحايدة التي لها تقريباً نصف حجم البروتون. ولا مجال للخطأ هنا إذ لا يوجد منها إلا نوع واحد.
- النظر إذا ما كانت تلك الجزيْئات تتفكّك بعيداً عن الهدف. وإذا ما التقطتم فائضاً في «الإلكترونات» التي تقومون برصدها، يمكننا اللقاء من غير خطر.

سهم للزّمن في المسْتوى المكْروسكوبي

في سنة 1998، أي ثلاثين سنة بعد اكتشاف اللاتوازي، مكَّنت تجربة جديدة من البرهنة أخيراً وبطريقة مباشرة أن ردّ فعل تحول الكاوونات المحايدة لا يحترم التوازي تحت انقلاب الزمن. بعبارة أخرى، لأول مرة تم تأكيد سيرورة مكروسكوبية يكون حاصلها مختلفاً تبعاً لكوننا أمام رد الفعل المباشر أو العكس. وبمشاهدة شريط هذه التفكّكات، يمكننا القول إذا كان الشريط معروضاً بالمقلوب أم لا، وهو ما يبرهن أخيراً وبشكل مباشر على وجود لاتوازٍ زمني في السيْرورات المكروسكوبية.

إنها تجربة CP-LEAR في المنظمة الأوروبية للبحث النووي قرب جنيف التي مكّنت من البرهنة على هذا الاختلاف، والتي كانت مُنتظرة باعتبار الاعتقاد الموثوق في نظرية CPT، غير أنها لم تخضع أبداً للرصْد. كان الطابع المبْتكر لهذه التجربة يكمن في استعمال حلقة صغيرة من المنظمة، وهي LEAR (أي «حلقة الطاقة الضعيفة للبروتون المضاد) حيث يتم تبطيء البروتونات المضادة المنتَجة بتصادمات طاقية لبروتونات على هدف، عوض تسريعها. فطاقتها الضعيفة تمكّن بعد ذلك من إيقافها في هدف غازي من الهيدروجين يتم وضعه في قلب التجربة CPT-LEAR وبعد ذلك، وفي 4 من 1000 من الحالات، رصد تفكك بروتون مضاد وبروتون في حال الراحة، إلى كاوون محايد وكاوون مشحون وبيْدق (الشكل 5). وحتى في الحلقة LEAR في المنظمة الدولية للبحث النووي، التي كانت أفضل منتج للمادة المضادة التي في حوزتنا، لم يكن من الممكن أن نحوز إلا على حواليْ مليونين من تفكّك البروتونات المضادة في الثانية. وبهذه الوتيرة، يلزم حوالي 10 مليارات من السنوات لإنتاج غرام واحد منها... وللاستفادة المُثلى من القدْر الضعيف من التفكّك التي تنتج الكاوونات المحايدة، فإن هذين المليونيْن من التفككات في



الشكل 5: التجربة CP-LEAR

تعيين الجزيئات

في التجربة CP-LEAR بالمنظمة الدولية للبحث الذري، ينْطل بروتون مضاد مع بروتون في سرعة تكاد تكون منعدمة (في قلب الرسم). وثمة حقل مغناطيسي متعامد مع مستوى الرسم، يمكن من تحديد شحنة الجزيئات. وفي عدد ضئيل من الحالات (أقل من 1 بالمائة) يمنحنا التفكك تشكيلة تسمح بالتعرُّف كلية على الكاوونات المحايدة المنتجة. وفعلاً، بما أن الكواركات الغريبة يتم خلقها في شكل أزواج من الكواركات والكواركات المضادة، فنحن نعلم أن الجزيْء المحايد المنتج، إزاء كاوون مشحون سلبياً (تبادلياً إيجابياً) يكون بالضرورة K° (تبادلياً K° مضاداً).

وحتى إن لم نقم بملاحظته قبل تفككه فيمكننا أن نعيد بناء وجهة انتشار هذا الكاوون المحايد باستعمالنا مسألة أن كمية الحركة الكلية منعدمة في تفكك يتم في حالة الراحة. المصدر: CEA.

الثانية كان يُعاد بناؤها بالقدر نفسه من السرعة للتعرف على الكاوونات المحايدة في خضمّ تفاعلات الإبطال.

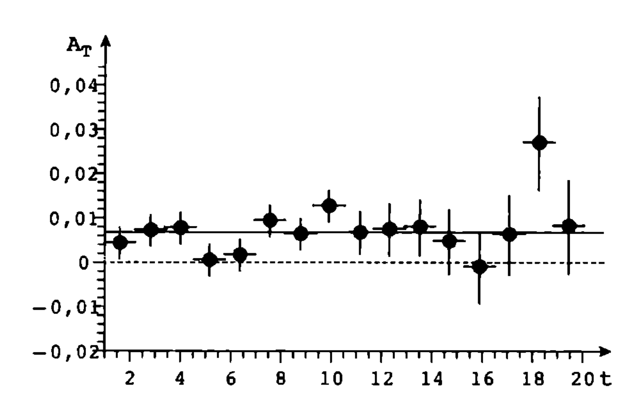
إن الطابع المبتكَر لتجربة CP-LEARN تعود إلى أنه من الممكن القول، حين يتم إنتاج كاوون محايد، إذا ما كان الأمر يتعلق فعلاً بكاوون أو بكاوون مضاد. يكفي النظر إلى علامة الكاوون المشحون المنتج في الآن نفسه مع الكاوون المحايد، باعتبار أن الكاوونات تنتج دوماً أزواجاً أو لا تنتج. وهكذا، حين يتم إنتاج كاوون مشحون إيجابياً، يصاحبه كاوون مضاد، وبالطريقة نفسها، يكون كاوون مشحون سلبياً مصاحباً لإنتاج كاوون محايد. وتشكل علامة البيْدق المنتج في الوقت نفسه تحقُّقاً ثانياً «يُنعت» عن حق كاوونا محايداً. ومع جزيئيْن مشحونيْن بعلامة معاكسة، فإن احتمال الخطأ في التعرف على الجزيْئات المنتجة يكون ضعيفاً جداً.

حين إبطال بروتون وبروتون مضاد، يتم إنتاج المقدار نفسه من الكاوونات المحايدة والكاوونات المضادة المحايدة. وسنرى إذاً كيف تتحول هذه الكاوونات والكاوونات المضادة تبعاً للزمن. وفعلاً، فإن التفاعلات الضعيفة تنْجز التحول دوماً (يسميها الفيزيائيون «المراوحة») بين الكاوون والكاوون المضاد المحايد، بوتيرة

سريعة جداً، تصل إلى أقل من مليارديم ثانية. وبما أننا نعلم، إذا ما كنا في البدء قد أنتجنا كاووناً أو كاووناً مضاداً، فإن الحيلة تتمثل في استعمال الانفعالات التي من أجلها تشير الجزيْئات المنتَجة إلى ما إذا كان الجزيْء في لحظة تفاعله قد «راوح» كي يصبح كاووناً مضاداً، أو أنه على العكس من ذلك يظهر من جديد في شكل كاوون.

إن دراسة مجْمل هذه الانفعالات تبعاً للزمن تسمح بأن نبْني في الآن نفسه معدل تحول كاوون إلى كاوون مضاد، وتحول كاوون مضاد إلى كاوون. بيد أن الانفعال أو رد الفعل الثاني ليس إلا الانفعال المعاكس للأول، وبالإمكان مقارنة المعدَّلين. وفي 1998، بعد ثماني سنوات من الدراسة نجح فيزيائيوCP–LEAR في النهاية في البرْهنة على اختلاف المعدل بين ردَّيْ الفعل هذين (الشكل 6).

وهكذا، فللمرة الأولى تمت البرهنة على رد فعل مكْروسكوبي كان يخرق التوازي T لقلب الزمن. ومع أن هذا الاختلاف دقيق ولا يساوي إلا أكثر قليلاً من ستة في الألف، فهو واقعي حقاً ومن المجْدي البحث عن تفسير لهذا التوازي الصغير بين الماضي والمستقبل في الظواهر المكروسكوبية.



الشكل 6: خرق T في CP-LEAR

إن الكاوونات المحايدة، في التجربة CP-LEAR للمنظمة العالمية للبحث الذري، ما إن يتم تعيينُها تبعاً للطريقة الموصوفة في الشكل 5، حتى يمكننا أن ننظر كيف تتفكك الكاوونات °K وبالأخص كيف تتحول إلى كاوونات °K مضادة تبعاً للزمن (هنا الوحدة 10^{-10}s). هذا التحول وعكسه هو ما مكّن من البرهنة على خرق التوازي الزمني T سنة 1998، المساوي لحوالي 6 في الألف. المصدر: CEA.

نظامٌ ثانٍ من الجزيْئات يبرزُ اللاتوازي

في 2001، أي ما يناهز الخمسين سنة بعد التجربة التاريخية لفيتش Fitch وكرونين Cronin وتورلي Turlay و كريستنسون Christenson ببروكلين، جاءت تجارب بابار BaBar بالولايات المتحدة وبيل Belle باليابان، للبرهنة أخيراً على مثال ثان للاتوازي بين المادة والمادة المضادة باستعمال التفكيكات، الأسرع ومن ثم الأصعب

في الدراسة، للميزونات B، التي تملك حجْماً حوالي عشر مرات أكثر من الميزونات K أو الكاوونات. فالميزونات، بسبب حجمها الأكبر، لها أيضاً أكثر من الطاقة ومن ثم أكثر من الإمكانات للتفكك، وهو ما ينجم عنه أن مدة حياتها تكون 60 مرة أضعف من مدة حياة الكاوون المحايد.

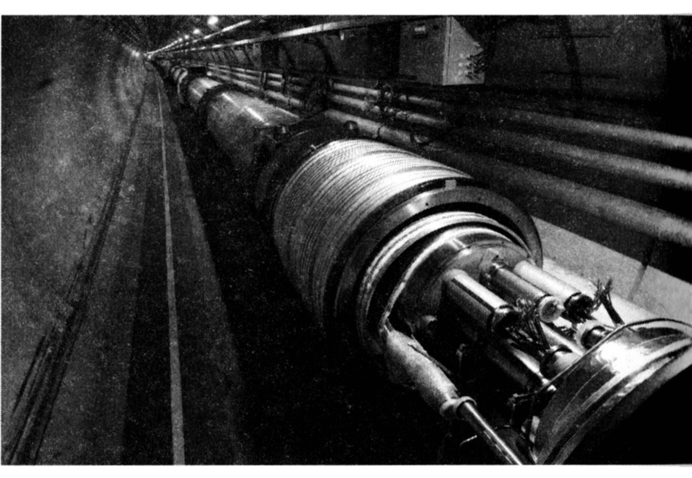
تفصِح الميزونات B، في بعض ردود الفعل، عن لاتوازٍ مهمّ بين المادة والمادة المضادة. وهكذا ففي 2004، استطاع المجرّبون أن يبرهنوا على لاتوازٍ واضح جداً في تفكك الميزون B إلى كاوون وبيْدق مشحونيْن. إن قيمة اللاتوازي هذه أهم بكثير من اللاتوازي الصغير جداً، بقيمة وحدة من 100000، التي يمكن ملاحظتها في صيغ تفكك الكاوون المحايد. وإذاً فإن نظام الميزونات B مكمّل لنظام الكاوونات، باعتبار أن هذا النظام الأخير يعلن عن معدل لاتوازٍ من العشرات في المائة في إقامة المراوحة بين الكاوون والكاوون المضاد. يمكّن اللاتوازي الملاحظ بين هذين النظامين من الجزيْئات إذاً من التحقُّق من أن النموذج ذا الأسَر الثلاث من الكْواركات يسمح بوصف خرق التوازي بين المادة واللامادة، بالرغم من أنه لا يسمح بالتكهُّن بقيمة معاييرها. وسوف تتطور أكثر دراسة تفكك

الميزونات B المحايدة في تجارب بابار Babar وبيل Belle وفي المستقبل في LHC بالمركز الأوروبي للبحوث الذرية بسويسرا (وهو عبارة عن آلة تصادم الجزيئات والجزيئات المضادة) (الشكل 7). وسوف تسمح بالتدقيق في انسجام وصف اللاتوازي بين المادة والمادة المضادة التي اقترحها النموذج العادي لفيزياء الجزيئات.

فهم خرْق التّوازي بين المادّة والمادّة المُضادة

خارج التطور الواقعي في دراسة خرق التوازي CP والتوازي T، فإن المشكل هو أننا، أربعين سنة بعد اكتشاف هذا اللاتوازي بين المادة والمادة المضادة، أو ما نسميه خرق CP، لا يمكننا أن نزعم بعدُ بأننا نفهم فعلاً هذه الظاهرة، بالرغم من علمنا بأنها يمكن أن تجد مكانها في بنية الجزْيئات كما نفهمها اليوم، والتي سوف نلخصها الآن.

ولتلخيص الطريقة التي بها تحترم الطبيعة التوازيات C و P، و T، فإن التفاعل الضعيف يبدو من بين الأربعة تفاعلات الوحيد الذي يخرق التحولات C وP، كاشفاً عن أن المادة والمادة المضادة لا يحترمان توازي المرآة في كل الظواهر التي يشتغل فيها التفاعل الضعيف. وهو يبدو أيضاً الوحيد الذي يبرْهن، في مستوى أضعف وفي



الشكل 7: الـ LHC (آلة تصادم الهادرون)

يصل طول نفق LHC (آلة تصادم الهادرون) بجنيف 27 كيلومتراً، وهو يحتوي على أكبر مسرّع في العالم، يستعمله فيزيائيو الجزيئات منذ 2007 لإنتاج بوزون هيغز، قصد دراسة توحيد التفاعلات ومحاولة البرهنة على التوازي الكبير. تتم التصادمات بين باقتيْن للبروتونات، سائرة في الاتجاه المعاكس بطاقة من 7TeV للواحدة. المصدر: CERN.

حال الميزونات المحايدة K وB وحدها، على خرق التوازي CP، الذي يمكّن من تحديدٍ مطلق للمادة بالعلاقة مع المادة المضادة، وللتوازي T الخاص بقلب الزمن.

هذه الخاصية للتفاعلات الضّعيفة مدهشة بشكل يبدو معه أن لا شيء يمكن أن يمنع في النموذج العادي، الذي يصف فهمنا للتفاعلات بين الجزيئات الأولية، أن يقوم التفاعل القوي أيضاً، الذي يتحكم في التفاعلات النووية،

بإبراز لاتوازٍ بين المادة والمادة المضادة. ولتفسير غياب هذا اللاتوازي في التفاعلات النووية، سعى روبرطو بيكشي Roberto Peccei وهيلين كوين Helen Quinn من جامعة سطانطفورد، إلى افتراض وجود جزيْء جديد. والاسم الذي سيحمله هذا الجزيء، أي الأكسيون، سوف يختاره له لاحقاً الفيزيائي التنظيري فرانك ويلكزيك Frank Wilczek انطلاقاً من اسم مسحوق للغسيل، باعتبار أن هذا الجزيْء الافتراضي الذي لم يتم رصده أبداً، يمكّن من «تنظيف» المشكل المحْرج للاتوازي التفاعل القوي.

لنلاحظْ أخيراً أن فيزيائيين رياضيين كروبرت والد Robert Wald من جامعة شيكاغو، أو طوم بانكس Tom Banks من جامعة روتجرز، قد طورا براهين[4] تمكّن من الشك في أن الجاذبية تخرق التوازي CPT. ويمكن أن يكون ذلك بالأخص في ميكانيزم تبخر الثقوب السوداء التي سنتحدث عنها لاحقاً.

العالَم الصّغير للجزيْئات

كان الفيزيائي الذي يبدأ حياته المهنية في الستينيات من القرن الماضي يجد نفسه أمام لوحة كثيفة من الجزيْئات. لقد كان الانطلاق مع ذلك من وضعية مطمْئنة: ففي

بداية القرن العشرين كان لا يزال من الممكن الوصف التام للمادة باعتبارها تجمّعاً من البروتونات والنوترونات والإلكترونات. بيْد أن رصد الإشعاع الكوني، ثم استعمال مسرّعات الجزيئات والتزايد المطّرد لطاقتها، قد كشف وجود عدد كبير من الجزيْئات، التي لا تزال طبعاً غير قارّة في أغلبها، غير أنها تظل مزْعجة بالانطباع الفوْضوي المكثّف الذي تمنحه للفيزياء. فكيف يمكن إقامة بعض النظام في هذه الحظيرة من الجزيْئات؟

بعض التناظمات في أسر الجزيئات توحي لنا بأن الوضعية لم يكن ميْؤوسا منها. فمثلاً، باعتبار أن البروتون والنوترون يتشابهان كثيراً بتفاعلاتهما، فقد توصل العلماء إلى فكرة أنهما يمكن أن يتكوّنا من «قطع آجُر» أوّلية قابلة لأن تعكس ذلك القرب. إن اكتشاف جيل الجزيْئات «الغريبة»، التي سُميت كذلك لأنها ستحتاج لوقت أكثر من المرتقب لكي تتفكك، كان يوحي أيضاً أن العلماء قد نجحوا بفعل عنف التصادمات في صنع أسرة ثانية من قطع الآجر، لم تنجح كثيراً في العثور على الطريقة التي بها يمكن أن تتفكك إلى قطع آجر أخفّ من المادة العادية، ومن ثم يأتي الوقت الذي تحتاجه للتفكك.

هذه الرؤية التي تأخذ شكل «قطع آجر» أولية، كما هو

الأمر في لعبة البناء الذي يمكن فيه استعمال العديد من التركيبات انطلاقاً من تجميع عدد صغير من القطع، نَدين بها للفيزيائييْن موراي جيل-مان Murray Gell-Mann وجورج زفيغ George Zweig. وقد أطلق عليها جيل مان اسم «الكْواركات»، استيحاء لجملة للروائي الإنجليزي جيمس جويس يمكننا ترجمتها كما يلي: «ثلاثة كواركات لمسيو مارك». إن فرضية هذه الكواركات المخْفية داخل الأنْوية الذرية، والتي هي أصلاً ثلاثة (قطعتا آجر المادة العادية لصنع البروتون والنوترون، وقطعة الآجر الغريبة)، سوف تتأكد كثيراً حين تنبأ شيلدون غلاشوو Sheldon Glashow وجان إيليوبولوس Jean Iliopoulos ولوتشانو مايانى Luciano Maiani بوجود كوارك رابع، سمي لوشارم le charme، ولم يلبث أن تم العثور عليه في سلسلة من الجزيئات.

ونحن الآن قد وصلنا إلى ستة كواركات، هي في الواقع، كما في حال الكواركيْن الاثنين اللذين يكوِّنان البروتون والنوترون، متجمعة في ثلاث «أسر» من الكواركات. وقد أطلق الفيزيائيون على هذه الكواركات الستة العديد من الأسماء، لا علاقة لها بالمفاهيم التي ترتبط بتلك الأسماء في اللغة الجارية. ربما تعتقدون بأن الوضعية

تتعقَّد بهذه الأسر الثلاث من الكواركات. لكن الأسر الثلاث، وبعدد المعايير التي تأتي بها، تمكِّن من التجسيد الطبيعي للاتوازي بين المادة والمادة المضادة، وهو ما لا تمكّننا منه أسرتان فقط[5]، بحيث يمكننا أن نعتبر أن عالَماً يملك ستة كواركات يمثل التسوية الأفضل للبساطة إزاء عالم خال تماماً من المادة، لا يسمح للملاحظين، الذين هم نحن، بالوجود.

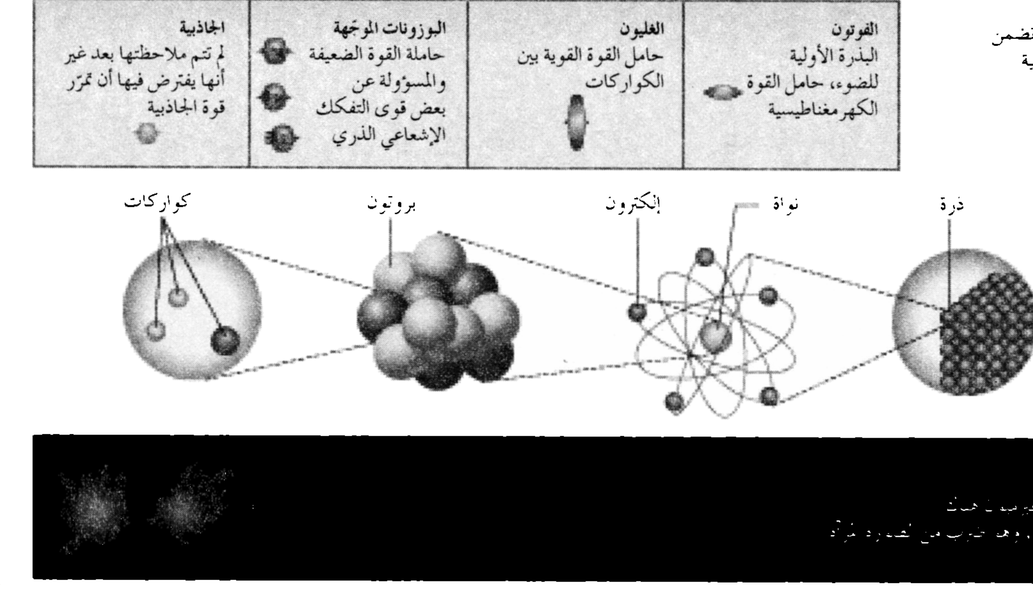
وإذا ما نحن أمعنّا النظر، فإن التبسيط الناجم عن إدخال الكواركات شبيه جداً بتبسيط الكيميائيين في القرن 19 وهم يواجهون عدداً لا يُحصى من المكوّنات المختلفة. واكتشاف أفوغاردو Avogadro لكون هذه المكونات تتجمّع تبعاً لأحجام بسيطة في الانفعالات الكيميائية أدى إلى تصنيف العناصر في لوحة مندلييف. ثم إن عناصر اللوحة تم وصفها في تبسيط لاحق باعتبارها تجمعاً للبروتونات والنوترونات. ويكشف وصفنا للجزيئات باعتبارها كواركات عن دمية روسية جديدة أصغر من السابقة، ومن حقنا التساؤل إذا ما كان هذا النزول نحو عناصر أكثر فأكثر «أولية» سينتهي يوماً إلى مكونات تكون كذلك بالفعل. لنعترف أننا لا نملك جواباً مطلقاً على هذا السؤال بالرغم من أن متابعتنا لوصفنا للجزيْئات سوف

الشكل 8: العالم الصغير للجزيئات

	كواركات حبيسة جزيئات أكبر		لبتونات يمكنها أن تتنقل بحرية	
الأسرة الأولى	**الإلكترون** المسؤول عن الكهرباء والتفاعلات الكيميائية شحنته هي −1	**نوترينو الإلكترون** من غير شحنة كهربائية ويتفاعل نادراً مع الوسط المحيط	**أسفل** شحنته الكهربائية من 3/1؛ البروتون يتضمن منها اثنتين، والنوترون واحدة	**أعلى** شحنته الكهربائية من 3/1؛ البروتون يتضمن منها اثنتين، والنوترون واحدة
الأسرة الثانية	**الميون** مصاحب أكثر كثافة من الإلكترون	**نوترينو الميون** خصائص مشابهة لخصائص النوترينو الإلكترون	**غريب** مصاحب أثقل» للأسفل»	**فتنة** مصاحب أثقل» للأعلى
الأسرة الثالثة	**الطو** أكثر فأكثر ثقلا	**نوترينو الطو** خصائص مشابهة لخصائص النوترينو الإلكترون	...... أكثر فأكثر ثقلا	**قمة** تم اكتشافه سنة 1995

الفرميونات
المادة مكونة من جزيئات هذه المجموعة

وهذه الجزيئات، في نظر الأغلبية، كانت موجودة مباشرة بعد الانفجار العظيم. واليوم لا نجدها إلا في الأشعة الكونية وفي المسرّعات.


البوزونات
جزيئات أساسية تضمن
تناقل قوى الطبيعة
الفوتون
البذرة الأولية
للضوء، حامل القوة
الكهرمغناطيسية
الغليون
حامل القوة القوية بين
الكواركات
البوزونات الموجّهة
حاملة القوة الضعيفة
والمسؤولة عن
بعض قوى التفكك
الإشعاعي الذري
الجاذبية
لم تتم ملاحظتها بعد غير
أنها يفترض فيها أن تمرّر
قوة الجاذبية
ذرة
نواة
إلكترون
بروتون
كواركات
المادة المضادة

يفتح أمامنا بعض المسالك.

إننا إزاء الكواركات، التي تتحكم فيها أساساً التفاعل القوي، الذي يسمى كذلك بالنظر إلى حدته الكبرى، نجد عالماً ثانياً هو عالم اللبْتونات. لنتذكَّر أن الإلكترونات في المادة العادية، تأتي لتغليف الأنْوية. وخلف الإلكترون، الذي لنا معرفة سابقة به، تمَّ بعد ذلك في الإشعاع الكوني اكتشاف المويون muon، وهو أثقل بمائتي مرة من الإلكترون، وبعد ذلك، كشفت مسرّعات الجزيئات أخيراً أسرة ثالثة بإلكترون جديد ثقيل، هو الطو tau، وهو أثقل بـ 3500 مرة من الإلكترون.

وكما أن لنا كواركيْن في الأسرة نفسها، نجد بخصوص اللّتونات، إزاء الإلكترون بالشحنة -1، جزيئاً بشحنة كهربائية محايدة، والنوترينو، أي «الجزيْء الصغير المحايد، كما سماه بلطف الفيزيائي إنريكو فيرمي Enrico Fermi. وبما أن شحنة النوترينو محايدة وأن النوترينو ليس كواركاً ولا يحس بالتفاعل القوي الذي يتحكم في الأنْوية، فهو يتفاعل بشكل ضعيف جداً مع المادة. وهكذا فنحن موضوع اختراق كل ثانية لمليارات النوترينوات الصادرة عن قلب الشمس من غير أن نشتكي من «ضربة شمس» بالنوترينوات. ولنمنحْ فكرة عن ضعف تفاعلاتها، فإن كل

واحد من هذه النوترينوات لا يملك ولا حظاً واحداً على مليار في التفاعل مع الأرض حين يعبُرها طولاً وعرضاً.

كما هو الحال مع الكوارْكات، فقد تمّ إلى حد اليوم اكتشاف ثلاث أسَر من اللّبتونات، وفي كل مرة نوعاً من الإلكترونات ونوتْرينه. وعلينا الإقرارُ أننا لا نعرف لحد الآن الجواب على هذا السؤال. كما أننا لا نعرف كيف نفهم لماذا للكواركات واللبتونات الأحجام التي نلاحظها في الطبيعة. لكن الإشارة إلى أن الكواركات واللّتونات تملك وحدة ضمنية آتية من أنّ الاختلاف في الشحنات الكهربائية لكواركيْن من الأسرة نفسها مساوٍ تماماً لاختلاف الشحنة بين ليبتونيْن من الأسرة نفسها.

ما الذي يدفعنا إلى أن نعتقد إذاً أن الكواركات واللبتونات لا تخفي جيلاً جديداً من الدُّمى الروسية؟ إنه معرفتنا بأن الضرب على الإلكترون بطاقةٍ جبارة، أكثر من مائة ألف مرة طاقة كتلته، من غير أن ننجح في كسر الإلكترون ولا أن نحس في داخل الإلكترون بالبنية الذرية التي يمكن أن تكون مخفية داخله. وهذا يعني أننا إذا برهنّا يوماً ما على وجود مكونات طاقية كبيرة في داخل الإلكترون، سيكون علينا أن نفسر كيف أن حجمها الكبير يمكن أن يُعوَّض بالطاقة (السلبية) للربط، لتكوين

شيء له حجم ضعيف كالإلكترون.

إن وصفنا للمادة لن يكون تاماً إذا لم نتحدث عن الجزيْئات التي تربط بين الكواركات واللبتونات، والتي تمكنها من أن «ترى بعضها بعضاً» بواسطة القوى المختلفة الكهرُمغناطيسية، القوية والضعيفة. ذاك هو حال الفوتون، وهو ذرة من النور تُعْلمنا عن القوة الكهرمغناطيسية. ولدينا أسباب وافرة لكي نفترض أنه هو جزيْء نفسه المضاد ذو الكتلة المحايدة. من ثم فإن صنع فوتون سيكون أمراً غير ذي كلفة كبيرة في الطاقة، بحيث إن مدى القوة الكهرُمغناطيسية تكون لانهائية، وتفسر أننا مثلاً يمكننا التقاط الحقل المغناطيسي لشيء بعيد جداً كعطارد. وفي حال التفاعل الضعيف، الذي يتحكم في تفكُّك المادة، نكون أمام ثلاث جزيْئات، هي البوزونات المتوسّطة، التي اكتشفها المركز الأوروبي للبحث النووي في بداية الثمانينيات. أما بخصوص التفاعلات القوية، التي تربط بين الأنْوية، فالغليّون gluon هو الذي يلصق بين مجموع الكواركات، بشكل قوي جداً بحيث لم يتم النجاح أبداً في صنع كواركات معزولة. لنغلقِ اللائحة مع الغرافيتون، المكرَّس لإعلان الجاذبية، وهو التفاعل الأكثر بداهة في حياتنا اليومية ومع ذلك الأكثر إلغازاً من الناحية النظرية،

كما أكدنا على ذلك.

لكن، انطلاقاً من هذه القوى الأربع، يمكننا تبسيط اللَّوحة البيانية. ففي بداية الثمانينيات شهدنا التوْكيد الباهر بالتجربة للوحدة بين التفاعلات الضعيفة والتفاعلات الكهرُمغناطيسية (بحيث يتم الحديث اليوم عن التفاعل الكهربائي الضعيف). إن افتراض أن لعبة التوحيد يمكن سحبها على التفاعل القوي الذي يتحكم في الأنْوية أمر بالغ الجاذبية باعتبار أنه يسمح مثلاً بتفسير أن شحنة البروتون وشحنة الإلكترون متعارضتان بدقة[6]. من هذا المنظور، فإن التفاعلات الثلاثة ليست من دون شك سوى الجوانب المختلفة للقوة نفسها التي تظهر وحدتها في الطاقة البالغة العلوّ. سنعود لهذا التوحيد بتفصيل أكبر في الفصل بعنوان: «تفكك البروتون». ربما كانت الجاذبية نفسها، التي تحدِّد الطريقة التي بها تحرِّف المادة الفضاء الزمن، قابلة للتجميع مع القوى الأخرى في إطار نظرية موحدة كنظرية الجاذبية القصوى مثلاً.

في هذه التراتبية للمادة التي توجد ملخصة في الشكل 8، سيكون الوصف صحيحاً لو أننا لم نتحدث عن الكواركات واللبتونات المضادة بدل اللبتونات. ومع ذلك فإن السيطرة شبه الكاملة للمادة في عالمنا تجعل من البدَهي

وصف أسر الجزيئات كما فعلنا، بالحديث عن المادة لا عن المادة المضادة، التي تكاد لا توجد من حولنا. لكن الأمر ربما لم يكن كذلك أبداً، والكون لا يزال يحمل آثار الصراع الأخوي المُميت بين المادة والمادة المضادة.

الباب الثاني

المادّة المُضادّة في الكوْن

الشروط الثلاثة لساخاروف

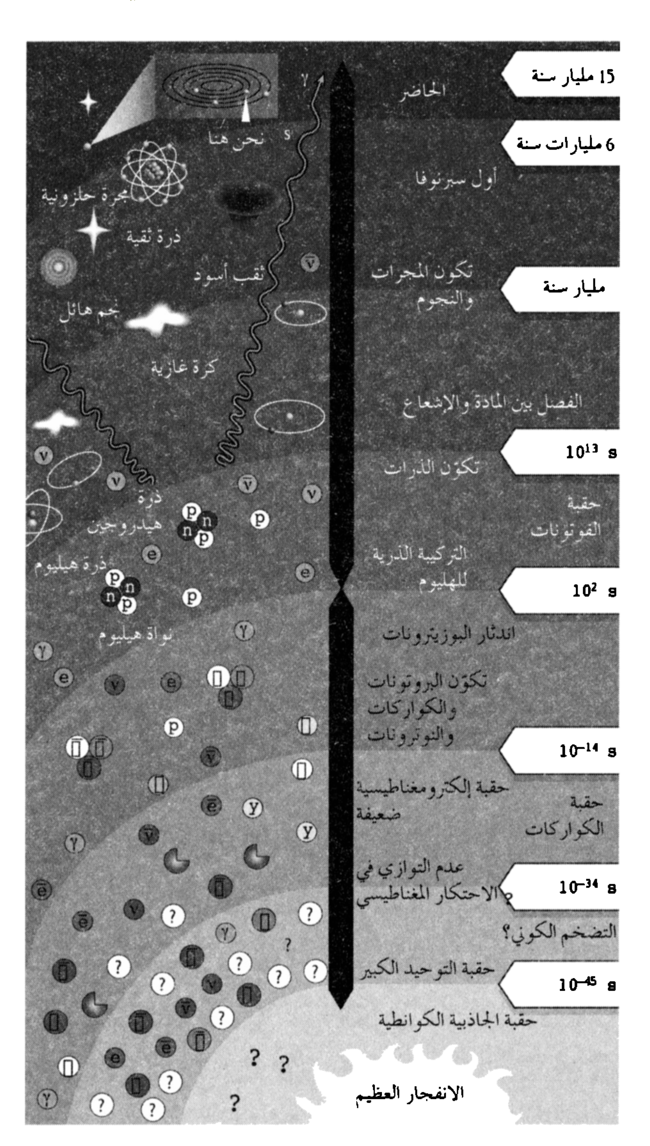
كان الفيزيائي والمنشق الروسي أندري ساخاروف Andrei Sakharov، هو أول من وعى، سنة 1967، أي ثلاث سنوات بعد الاكتشاف التجريبي لخرق CP في الكاوونات المحايدة، بأن خرق CP، وهو لاتوازٍ في السلوك بين المادة والمادة المضادة، سيمكّن من الانطلاق من كون كامل التوازي بين المادة والمادة المضادة، والوصول مع ذلك إلى كون لا يتضمن إلا المادة. بيد أن ساخاروف انتبه بسرعة إلى أن خرق CP الوحيد لم يكن يكفي لتفسير سيطرة المادة على المادة المضادة، التي تبدو شبه كلية.

لقد تعرّف ساخاروف بالفعل على ثلاثة شروط ضرورية للوصول إلى هذه النتيجة. أولاً، يلزم طبعاً رد فعل يكون مختلفاً تبعاً لكوننا إزاء جزيْء أم جزيْء مضاد، ثم يجب أن تكون البارْيونات، باعتبارها تجميعا لثلاثة كواركات تشكل المادة العادية، ألا تكون مستقرة تماماً، وإلا فإن خرق CP لن يكون له أي تأثير على البروتونات والنوترونات التي تكوّن المادة الذرية. وأخيراً، ربما الشرط الأقل توقعاً، بحيث يلزم بالضرورة، في اللحظة

التي تلعب فيها ردود الفعل التي تخرق التوازي بين المادة والمادة المضادة دوراً مهماً، أن يكون تطور الكون ذا عنفٍ كافٍ كي لا تستطيع ردود الفعل بين الجزيْئات أن تساير هذا التطور. وبما أن ساخاروف كان معزولاً في بلد بدأ ينشق عليه بشكل أكثر فأكثر وضوحاً، فإن نتائج بحوثه لم تكتب لها الشهرة لسنوات عديدة. وفي 1970، قام الفيزيائي الروسي فلاديمير كوزمين Vladimir Kuzmin بالاستشهاد بورقة ساخاروف، وفي 1974، حين أبانت نظريات التوحيد بين القوى الأساسية عن أن الكواركات واللبتونات عليها التحول الواحدة للأخرى بطاقة عالية جداً، ظهرت في الأخير أهمية تحاليل ساخاروف التي لم يتم تفنيدها منذ ذلك الوقت.

تاريخ مختصَر للكون

إن الكون لذو عنف كبير وصفناه في التمهيد، حيث المادة والمادة المضادة تبطل إحداهما الأخرى في لقاء انتحاري. لنصعدْ بالذهن نحو الانفجار الهائل الأول الذي يمثله البيغ بانغ إلى تخوم الكون. تمكّننا معادلاتنا من موْقعة العمر الذي قبله كانت فيه مفاهيم الفضاء والزمن والحرارة لا معنى لها في 10^{-43} ثانية. والحديث هكذا عن


15 مليار سنة
الحاضر
نحن هنا
6 مليارات سنة
أول سبرنوفا
مجرة حلزونية
ذرة ثقيلة
ثقب أسود
تكون المجرات والنجوم
مليار سنة
نجم هائل
كرة غازية
الفصل بين المادة والإشعاع
10^{13} s
تكوّن الذرات
ذرة هيدروجين
حقبة الفوتونات
التركيبة الذرية للهليوم
ذرة هيليوم
10^{2} s
نواة هيليوم
اندثار البوزيترونات
تكوّن البروتونات والكواركات والنوترونات
10^{-14} s
حقبة إلكترومغناطيسية ضعيفة
حقبة الكواركات
عدم التوازي في الاحتكار المغناطيسي
10^{-34} s
التضخم الكوني؟
حقبة التوحيد الكبير
10^{-45} s
حقبة الجاذبية الكوانطية
الانفجار العظيم

الشكل 9:

اللحظات التي تسبق هذا الزمن القصير إلى أقصى حدّ هو أمر بالتأكيد مفْرغ من المعنى. ففي هذه الصرخة الغاضبة لميلاد الزمن والفضاء، بلغت درجة الحرارة القيمة الخيالية لمائة مليار مليار مليار درجة (10^{32})، وهو رقم لا يمكن تصوره في ذهننا البشري، الذي يعتبر أن بضع مئات من الدرجات تعتبر جهنم حارقة لا تُتحمَّل.

وكما سنرى ذلك، ففي هذه الشروط القصوى، على المادة والمادة المضادة أن تتعايشا بالضرورة بمقادير تكاد تكون متساوية. وهذا يعني أن صنع جزيْء أو جزيْئه المضاد يكلف الثمن نفسه بالطاقة. وبما أن الحرارة بالغة الارتفاع في اللحظات الأولى للكون، فإن الحركة الحرارية تصنع آلياً المقدار نفسه من الجزيْئات والجزيْئات المضادة.

علينا الاعتراف أننا نعلم أشياء قليلة عن سلوك الكون خلال المِكْروثانية الأولى لوجوده. وإذا ما تأملنا في الأمر جيداً، فمن العجيب والمدْهش أن تمنحنا الفيزياء معلومات موثوقة عن مرحلة قريبة جداً من الانفجار الهائل. بيد أن العديد من الثورات قد تمّت في هذه المكْروثانية. فالتفاعلات، الكهرُمغناطيسية الضعيفة والقوية، التي تتحكم في مادة عالمنا الهادئ، على الأقل بالمقارنة مع الكون الأولي، كانت بالتأكيد في البداية قوة وحيدة واحدة. لقد

انفصل التفاعل القوي بالتأكيد عن التفاعل الأول في عمره الصغير جداً من 10^{-36} ثانية، وأوهمنا بعد ذلك باستقلاله عن التفاعلات الأخرى. ثم حصل الانفصال بين القوتين الضعيفة والكهرمغناطيسية، التي نعرف كيف نجرّبها اليوم واللتين استطاعتا حتى الآن، أي في حوالي عشرة مليارات جزء من الثانية (10^{-10}s) أن تحافظا على وحدتهما.

ظهرت المادة، كما نعرفها، في شكل جزيئات لكل واحد منها شخصيته، حين كان الكون قد بلغ تقريباً عمر حوالي مائة ألف جزء من الثانية (10^{-5}s). وكان المزيج من المكونات (من الكوارْكات والكوارْكات المضادة ولُحمتهما من الفوتونات والغلْيونات) لا يزال بالغ الكثافة، أي بكثافة تناهز مائة مليار من الكيلوغرامات في السنتمتر مكعَّب، بحيث كان من المستحيل رصده، لو افترضنا أنه قادر على العيش في هذا الجحيم الذي تبلغ حرارته ألف مليار من الدرجات، التعرف على المكونات في هذا الحساء الزراعي الرهيب.

في هذا العمر من مائة ألف جزء من الثانية (10^{-5}s)، لم يعد الكون، الذي يبرد ويمتدّ بسرعة باهرة، من الكثافة بحيث يستطيع ملء الفضاء بالمادة النووية: فالكواركات

وجزيئاتها المضادة أي الكواركات المضادة، عليها أن تختار اللجوء للاختباء داخل النيكيون وترك المكان فارغاً. وفي الوقت الذي تتجمع فيه المادة الذرية، ندرك فجأة أن اللعبة انتهت بشكل غريب فالمادة المضادة توجد بشكل قوي كأقلية، ولا يوجد ثمة من بروتونات مضادة. وخلال واحد من ألف ثانية (10^{-3}s) تصارع المادة المضادة الذرّية من أجل بقائها، بلا جدوى طبعاً، من خلال إعادة تنظيم نفسها في جزيْئات أقل كلْفة في الطاقة من البروتون أو النوترون، والميزونات التي تنجم عن تجميع كوارك وكوارك مضاد، والتي هي مادة ومادة مضادة أيضاً. بيد أن هذا الزواج المضاد للطبيعة، أي الكوارك ضد الكوارك المضاد، لا يستطيع طويلاً مقاومة ابْتراد الكون. فلا يبقى بعد ذلك إلا تجمّع من البروتونات والنوترونات الخاضعة للصدمة الدائمة للإلكترونات والبوزيتْرونات والفوتونات.

وبعد أن نترك الكون يفقد من جديد حصة كبرى من عنفه لصالح توسّعه، سنلاحظه الآن وهو يحتفل بنهاية الثانية الأولى من وجوده. في هذه اللحظة يتعرّض كوننا لتطور جديد مهم بحيث يملك لآخر مرة كميات متساوية من الإلكترونات والبوزيترونات. ففي عمر ثانية

واحدة انخفضت الحرارة «فقط» بعشرة مليارات درجة، غير أن صدمات هذه الحرارة هي من العنف بحيث إن الإلكترونات والبوزيترونات ما تزال تنتجها بالحرارة المفرطة المحيطة بكميات قريبة التساوي.

لكن في عمر الكون في ثانيته العاشرة اختفت كل البوزيترونات تقريباً، ولم يعد موجوداً الآن غير رماد الإبطال في شكل مادة ومادة مضادة، أي الفوطونات التي هي جزيئاتها المضادة في ذاتها. يمكننا الآن القيام بالحصيلة الحسابية، ونقيس اللاتوازي الذي تم بناؤه بين المادة والمادة المضادة، بالرغم من أننا لا يمكننا أن ننكر أنه كان موجوداً منذ البداية. وهكذا لكل بروتون ما يزال باقياً على قيد الحياة نجد حوالي مليار ونصف من الفوطونات الشاهدة على الإبطال السابق، وهو ما يمنحنا فكرة عن ضعف اللاتوازي بين المادة والمادة المضادة. أما أن يكون هذا اللاتوازن قد تم فقط في مجال المادة أو في الكون بكامله، فهو أمر لا نعلم عنه شيئاً بالتدقيق.

في هذه الفترة أيضاً، انبنت الأنْوية في الوقت الذي لم يكن للنوترونوت التي ظلت حرة من اختبار غير التفكك إلى خمس عشرة دقيقة من البروتونات والإلكترونات والنوترونات المضادة، إذا هي لم تتمكن قبل ذلك من

الاختباء في نواة تنقذها من التفكك. وحدها النوى الأكثر خفة (الدوتيريوم البالغ الهشاشة بحيث يحترق في النجوم، والهيليوم، وقليل من الليثيوم ومقادير تجانسية من الأنْوية أثقل شيئاً ما كالكربون والآزوت والأكسيجين) يتم إنتاجها بمقادير محسوبة خلال هذه المرحلة التي تسمى التركيبة النووية. وإذا كانت المادة المضادة تسهم دائماً بشكل كبير في طاقة الكون، فذلك بالغش بعض الشيء، بفضل الفوتونات التي هي جزيئاتها المضادة، والتي ما زال تحافظ على قوة كبرى.

وحين بلغ الكون حوالي 380000 سنة، انطفأت حماسة شبابه في تحول جديد: كانت مادة الكون لحد ذلك الوقت من السخونة بحيث إن الذرات لم تكن تستطيع مقاومة الصدمات المتوالية بين الجزيئات والفوطونات. وبما أن المادة كانت لحد ذلك الوقت بالغة التدمير للبلازما، أي للإلكترونات والأنْوية الحرة، كما في المشاعل القادرة على ثقب الصناديق المصفحة الأكثر مقاومة للأشعة، فقد صارت أخيراً قادرة على تنظيم نفسها في ذرات باعتبارها جزُراً صغيرة للمادة حيث يتم حبس الإلكترونات بالأنْوية. وستصبح الفوتونات الآن مجبرةً على التمطُّط وفقدان طاقتها بتوسُّع الكون، ومساهمتُها في طاقة المادة

المتبقية سوف تصير نافلة أكثر فأكثر أمام طاقة المادة الذرية.

واليوم، فإن كوننا الذي يتجاوز عمره عشرة مليارات من السنين، ما إن نبتعد عن بؤرة حرارة نجم كشمسنا، لا يملك سوى حرارة تناهز الثلاث درجات مطلقة (مائة مرة أقل من الحرارة المعتادة على سطح الأرض). وفي كونٍ أكثر هدوءاً من الكون في لحظته الأولى، والذي ما زال يخفي جيوباً من القلاقل كالسيبرنوفا والكازارات، نسعى للبحث عن المادة المضادة.

هل ثمّة مناطق شاسعة من المادّة المضادة في الكون؟

إذا كان التوازي كبيراً جداً بين المادة والمادة المضادة، وإذا كان الاختلاف في السلوك لا يتم رصده إلا في مكان جد خفي من الفيزياء، فإن السؤال يُطرَح الآن عن فهم لماذا لا يحوي محيطنا المباشر مادة مضادة، والحال أن مناطق عديدة من المادة ما تزال باقية كما يؤكد على ذلك وجودنا. يمكننا أولاً الإجابة على هذا السؤال ببراهين نظرية قصد تقويم إمكانية تكوُّن مناطق شاسعة من الكون من المادة المضادة، مثلاً. لكن يمكننا أن نكون أكثر براجماتية وأن ننقِّب تجريبياً عن هذه المناطق المْكنة من المادة المضادة

التي قد تكون بقيت حيَّة بعد الحساء الزراعي للكون الأصل. إن تحليلنا للوضع الحالي الذي تلمع فيه المادة المضادة بغيابها، يقوم فعلاً على مجموعة من الفرضيات، بعضها لم يتم التحقُّق منه بعدُ تجريبياً. يمكّننا هكذا أن نطرح السؤال لمعرفة إذا ما كانت المادة المضادة تملك كتلة جاذبية إيجابية، أو إذا ما كانت توجد مادة غريبة تثير تنابُذاً جاذبياً. في الحالة المعاكسة، فإن وصفنا لعلم الفلك سوف يتعرض للتحْوير بعمق، مشكّكاً في النتائج التي وثقنا فيها لحد اليوم. هذه الفرضيات، التي كانت تبدو مجانية في أواسط التسعينيات، حين ظهرت الطبعة الأولى لهذا الكتاب، سوف يعاد إطلاقها منذ نهاية التسعينيات عبر الرصد المؤكد لتسارُع توسُّع الكون. وسوف نتطرق لهذه الفرضية التي حظيت بالنقاش والاختلاف في فصل مقبل.

فصيلة آيلة للانقراض

يعتبرُ نفرٌ كبيرٌ من الفيزيائيين أن إمكانية وجود مناطق كبرى من المادة المضادة في كوننا أمر غير محتمل. وإذا كان هذا الرأي، في جزء كبير منه، يقوم على مسْبقات نظرية، علينا الاعتراف بأن الدراسات التي تم إنجازها في الستينيات، قصد محاولة تبرير كون متوازٍ، أي يتضمن

المقدار نفسه من المادة والمادة المضادة، ليست دراسات مقنعة ولا مشجِّعة. وكانت المحاولة الأكثر مثالية لبناء نموذج يقود إلى كون متوازٍ من هذا القبيل، قد دافع عنها الفيزيائي الفرنسي رولان أومنيس Roland Omnès في الستينيات. فحسب هذا الأخير، قبل أن يستطيع الكون ملء الفضاء بالمادة الذرية، حين كان عمره حوالي مائة ألف من الثانية، كانت المادة والمادة المضادة تفضلان بالأحرى أن يدمِّر بعضها بعضاً في لقاء انتحاري، ومن ثَمَّ التجمع كل واحدة منها في جانب. إن وضعية من قبيل هذه تتم كما في المزْج بين الزيت والخلِّ حيث كل واحد منها يجتمع شيئاً فشيئاً في معْزل عن الآخر.

للأسف، فإن هذا الاختيار لم تؤكده التجربة وأغلب المؤلفين يعتبرون أن كميات المادة والمادة المضادة التي ستتمكّن بهذه الطريقة من العيش في الأزمنة الأولى السحيقة ضئيلة جداً. فالكون هو بكل بساطة بالغ الكثافة في بداياته كي يسمح للمادة والمادة المضادة أن تتفاديا تحطيم بعضهما بعضاً؛ وفي الكوسمولوجيا العادية، فإن الزمن المسموح به لتفريق المتضادات يبدو ضئيلاً جداً، بالكاد بعض الميكروثوانِ، كي تكون التفرقة فعالة. إن الوضعية هي تقريباً من 50000 من مساندي نادي مانشستر يونايتد

لكرة القدم مختلطين في ملعب بـ50000 من مساندي نادي ميلان آسي الإيطالي، والذين عليهم التجمع من غير تطاحن أو خسائر في مجموعتين معزولتين. ففي اللقاء بين المادة والمادة المضادة، وإذا نحن حسبنا عدد الفوتونات القاتلة التي نجدها اليوم في الإشعاع الكوني (أكثر قليلاً من 400 في السنتمتر مكعب، فإن حوالي واحد من المليار (10^{-9}) من المادة الأصلية قد بقي على قيد الحياة، بما أننا لاحظنا كثافة متوسطة من بروتون في المتْر مكعب.

لكن، إذا نحن طبقنا قواعد الكسمولوجيا العادية على خليط يكون أصلاً متجانساً من المادة والمادة المضادة، فإننا نبرهن على أنه لن يبقى إلا كسر 10^{-18} من المادة الأصلية، أي أننا أمام كون شبه فارغ، غير قادر على إنتاج بنيات كوننا ومجرّاته.

ثمة فرضية أخرى قد تستطيع استعادة كميات مهمة من المادة المضادة في الكون، تتمثل في افتراض أن ما نسيه الفراغ يمكن أن يكون له تعريف مختلف من نقطة لأخرى في الفضاء. وسوف تشبه الوضعية بعض الشيء حالة مغْنطَة كرة من الحديد الليِّن، تتمغْنط بشكل مستمر في الحرارة العادية. وإذا ما نحن زدنا كثيراً في الحرارة، سوف تفقد مغْنطتها بفعل التقلقل الحراري. ومع التبرُّد، تنزل

الحرارة تحت قيمة معينة، فتعود المغْنطة للظهور. وإذا كانت الخامة خالصة، من المستحيل التكهُّن بما ستكون عليه وِجْهة مغنطة الكرة، إذا لم يأت أي مغناطيس في الجوار لفرض الوجهة.

يمكننا أن نفترض، مع أن الأمر ليس لحد الآن سوى فرضية، أن تغيراً مماثلاً في الحالة قد تمّ في الكون الأوَّلي. فبعد الانفجار العظيم مباشرة، رأينا أن الكون قد برد بسرعة هائلة. بالإمكان إذاً أن توجد في الكوْن سلسلة كاملة من المجالات حيث يختلف تعريف الفراغ، ومن ثم تعريف المادة والمادة المضادة، من نقطة لأخرى. هذه الفرضية، المجانية تماماً في الوضع الراهن للنظرية، والتي تبدو مع ذلك معقولة باعتبار التناظر مع مثال المغْنطة، ستسمح بتبرير وجود مناطق كبرى من الفضاء مليئة تبادلياً بالمادة والمادة المضادة.

منذ عشرين سنة، طرح الفيزيائيون بطريقة ملْحاحة وجديَّة مسألة معرفة إذا لم يكن الجيل الجديد من مسرِّعات الجزيْئات قادراً على إثارة تغيُّر في الحالة كهذه له نتائج كارثية، أي ذبذبة تصادم تنتشر بسرعة قريبة من سرعة الضوء بحيث تحرق كل شيء في مسارها. والجواب الذي توصَّل إليه المؤلفون الأوائل الذين تعرضوا لهذه المسألة

لم يكن مطمْئنا لأنه كان يقوم على أن تصادم جزيئات الإشعاع الكوني ذي الطاقة الهائلة يناسب طاقة أكبر من الطاقة التي نتوصّل إليها اليوم عبر المسرِّعات، وبما أننا لا نزال اليوم موجودين لنقاش ذلك، فهذا دليل على ذلك.

عادت هذه المسألة للواجهة، وكانت محط نقاش مطوَّل في مجلات تبسيط العلوم كمجلة من أجل العلم (Pour la science)، مع إنشاء المسرِّع LHC في المنظمة الدولية للبحث النووي، الذي سوف يطرح طاقات أهم بحوالي معامل 10 مقارنة مع تلك التي كنا قد توصلنا إليها بمسرّعاتنا. إن فكرة أن الأبعاد الإضافية لنظرية الحبال، التي تمكّن بالتأكيد وأخيراً من تحديد كمية الجاذبية، يمكن بلوغها في LHC وهو ما عضّد فرضية أن آلة تصادم الجزئيات هذه، قد تمكّن من صنع ثقوب سوداء مكْرسكوبية. وإذا كان الفيزيائيون لا يملكون يقيناً مطلقاً بهذا الصدد، فإن الرأي العام يرى أن هذه الثقوب الصغيرة السوداء ما إن تتكوَّن حتى تتفكَّك بالضرورة بسرعة فائقة بفعل حجمها الصغير.

وكما نرى، ففي غياب فهم حقيقي لما يمكن أن يكونه الاختلاف بين المادة والمادة المضادة، فإن المنظِّرين لا ينقصهم الخيال كي يبرّروا وجود مناطق كبرى من المادة

المضادة، بالرغم من أن الغالبية العظمى من الفيزيائيين يراهنون عن يقين على كوْنٍ يتكون كلياً من المادة. كيف تسمح لنا معرفتنا بالكون بالتدقيق أو الحدّ من كمية المادة المضادة الموجودة في النظام الشمسي، في مجرتنا أو في المجرات المجاورة، أو أيضاً في ركام المجرات التي تكشف لنا عنها الخرائطيات الكبرى للكون؟ ثمة إمكانيتان تواجهاننا: من جهة أن نسعى إلى رصد ومضة إشعاع غاما ناجمة عن إبطال المادة والمادة المضادة لبعضهما بعضاً، ومن جهة ثانية، القياس المباشر لحجم المادة المضادة الموجودة في الإشعاع الكوني، أي الجزيئات التائهة في فراغ الفضاء على هوى الحقول الكهرومغناطيسية.

بحثاً عن إشارات الانفجار

كما أشرنا إلى ذلك آنفاً، فحجم ولو ضئيل من المادة المضادة قادر على أن يحدث في محيطنا كوارث مهمة. لكن صنع المادة المضادة بكميات معقولة أمر صعب وحمايتها من الإبطال أمر أصعب، بما أن مجمل هذه المادة المضادة تبطل بشكل عفوي ما إن تلتقي بالمادة. يمكننا إذاً أن نستخلص من هذه الملاحظة أنه لا يوجد مصدر مقبول للمادة المضادة على الأرض وإلا صار عالمنا بسرعة غير قابل للعيش، على

الأقل لوجود إشعاعات منبعثة من إبطال المادة.

وعلى بُعْد ثانية ضوئية منا، لا يمكن للقمر أن يتكوّن من المادة المضادة، وإن كان ذلك لن يروق لبعض مؤلفي الخيال العلمي النُّجباء. وكما يقول ذلك بسخرية الفيزيائي الإسباني ألفارو دو روخولا Alvaro de Rujula، فإن البرهان الأفضل يتمثل في كون القمر إذا كان مكوناً من المادة المضادة، فإن أثر قدم لويس أرمسترونغ سيكون فوَّهَة بقطر من بضعة كيلومترات[7]. بصيغة أدق، فإن القمر، مثله في ذلك مثل الأرض، يتعرض دوماً لهجمات النيازك، وإبطالها في القمر سيكون من السهل التقاطه من قبل الومَضات المنبعثة من اللقاء.

أما النظام الشمسي، فبالرغم من الغياب شبه التام للمادة خارج الشمس والكواكب، فهو أبعد من أن يكون موطناً للسلم الذي يمكّن المادة المضادة من العيش لأوقات مقبولة. وفعلاً، فإن كومات المواد التي تطلقها الشمس، التي تغذي الرياح الشمسية، ستشكل بسرعة خطراً على جسم من المادة المضادة، أكان نجماً أو كوكباً، بحجم مقبول. فإذا ولج هذا الدخيل، المرعب بقدراته التحطيمية، إلى نظامنا الشمسي، فإن وجوده سيكشف عنه حالات الإشعاع غاما المنبعث من لقائه مع الشمس.

من وجهة نظر الملاحظة سيكون من الصعب الكشف في محيطنا عن شيء بحجم ضئيل كنيزك من المادة المضادة. لكن، كما أن قطعة من الجليد تملك بشكل لانهائي حظوظاً أقل من الجليد العائم القطبي لكي يبقى موجوداً في رحلة تحمله من القطب الشمالي إلى المحيط الأطلسي، كذلك من غير المتصور أن شيئاً من حجم النيْزك، الذي يمكن أن يتراوح بين حجم تلّ ومرتفع جبلي، إذا ما كان محمّلاً بالمادة المضادة، أن يعيش حين التماس مع الريح الشمسية. إن جزءاً ولو ضئيلاً، من درجة واحد في المائة الألف، من النجوم التي قد تتشكل من المادة المضادة، ودوماً بسبب الإشعاع غاما الناجم عن إبطال المادة على سطحه، سنلاحظ في سمائنا انقشاعاً ضبابياً من الإشعاع غاما يكون أهم من ذلك الذي تسجله أقمارنا الصناعية الخاصة بمراقبة الفضاء.

النتيجة نفسها يمكن أن تنطبق على مستوى مجرَّتنا. فبالرغم من أن مجرتنا تبدو شفافة في الكثير من مناحي القبة السماوية، فإن ما نسميه الفراغ بين النجمي بعيد عن أن يخلو من المادة. والسبب في ذلك أن حجم المجرة لم يتكثّف بعدُ في شكل نجوم أو بالعكس أن النجوم لفظتْه من جديد. وهذا الغاز لا ينتظر غير معونة حدث

جديد زلزالي لمجرتنا، كانفجار سبرنوفا، كي ينهار بدوره في شكل نجم. بعبارة أخرى، إن مجرَّتنا ليست بعد عجوزاً كي يكون غيْم الغاز الموجود في المجرَّة ورماد النجوم قد التقطته الثقوب السوداء التي تبتلع كل شيء يمرُّ بمحاذاتها، أو النجوم الميتة. فهذا الغاز البين نجمي المتراكم، كما هو الحال في النظام الشمسي، بالرغم من أنه أقل كثافة من الرياح الشمسية، يشكل خطراً كبيراً على كل شيء يتشكل من المادة المضادة بحجم مقبول. وتقدر الكمية القصوى للمادة المضادة التي يمكن أن توجد في شكل غاز في مجرتنا بجزء من مليون مليار (10^{-15}).

إن البرهنة التي تؤدي إلى إقصاء أن تكون بعض المجرات من ركامنا المحلي متشكلة من المادة المضادة تكاد تكون متطابقة. ففي الركامات، تكون التصادمات بين المجرات مسألة جارية وتقود من جديد إلى إنتاج مهم من الإشعاع غاما، حالما تلاقي مجرَّةٌ من المادة المضادة مجرةً من المادة. وعلى عكس ما يمكن أن يقودنا إليه حدسنا، لا يوجد في الواقع إلا القليل من التصادمات المباشرة بين نجميْن في التصادم بين مجرَّتيْن. إنه من جديد غياب البثّ الكثيف من الإشعاعات غاما، حين يحدث صدام يؤدي هنا أيضاً إلى التفكير في أن كل المجرات أو جلها، في الركام

نفسه، تتكوَّن بشكل موحد من المادة (أو ربما كلها من المادة المضادة، في حال بعض الركامات من المادة المضادة).

والحقيقة أننا نلاحظ في السماء نفحات من الإشعاعات غاما؛ لكن، أن ننسبها لإبطال أشياء من المادة المضادة يبدو من قبيل الفرضية المغالية. في الواقع، فإن طاقة الغامات التي تُسجَّل تبدو ضعيفة جداً (بنسبة MeV أي حوالي واحد من الألف من كتلة بروتون أو نوترون، الذي هو بنسبة GeV) كي تنبع من تقاتل المادة والمادة المضادة.

إن الإلكترونفولت، الذي يكتبeV، هو الطاقة التي يكتسبها الإلكترون حين نخضعه لاختلاف في المقدرة الكهربية من 1 فولت. وهذه الوحدة من الجدوى بمكان، ذلك أن البثّ الضوئي للذرات يتمّ في هذا السلم الطاقي. والفيزيائي المتخصص في الجزيئات معتاد على مضاعفة هذه الوحدة لأنه يتوجَّب عليه الضرب بقوة أكبر كي يتوصل إلى خلق جزيْئات كبيرة. وهكذا فإن الكيلو-إلكترونوفولت (keV) أي 1000 إلكترونوفولت، والميغا-إلكرونوفولت (MeV) أي طاقة نفحاتنا من إشعاعات غاما، مليون إلكترونفولت، في حين أن الجيغا-إلكرونفولت (GeV) والتيرا-إلككترونفولت (TeV) يمثل كل واحد منهما مليار وبليون (10^{12}) إلكترونوفولت.

«رجْفات» الإشعاع غاما

إن كوننا مصدر لأحداث ذات عنف لا نظير له. «رجْفات غاما»، وهو الاسم المطلَق على نفحات الإشعاع التي تبدو خلال مدة من بضع ثوانٍ إلى بضع دقائق، هي مثال لظواهر كهذه. وقد اكتشفتها بالصدفة في أواسط الستينيات الأقمار الصناعية العسكرية الأمريكية التي تراقب الانفجارات الذرية. وبما أن تلك المعلومات كانت محكومة بالسرّية العسكرية، فلم يتم الكشْف عنها خلال العديد من السنين، حتى سنة 1973، وهي الفترة التي اقتنع فيها العسكريون بأن «رجْفات غاما» آتية من الفضاء ولا علاقة لها بالأنشطة العسكرية السوفياتية.

إن الغامات التي يتم بثها خلال هذه «الرجفات» تملك طاقة من نسبة ميغا-إلكترونوفولت MeV، لكن أحياناً من العشرات من ميغا-إلكترونوفولت. وهذا ما يضعها بوضوح في ما تحت مستوى الطاقة، التي تكون نسبتها 100 إلى 200 ميغا-إلكترونوفولت MeV من الإشعاعات غاما التي يتمّ بثّها في الصراع القاتل بين المادة والمادة المضادة الذي ندرسه في مختبراتنا. لكن هل مصدر هذه النفحات غاما مرتبط بأحداث انفجارية متقاربة، أم متباعدة كسمولوجيّا؟ في الحالة الأخيرة، فإن الانزياح

نحو أحمر الإشعاع، الذي يعود إلى توسع الإشعاع، قد يؤدي إلى رصد الإشعاع غاما من الإبطال بطاقة تكون من بضعة ميغا-إلكترونوفولتات إلى بضع عشرات من ميغا-إلكترونوفولت. لكن إذا كانت الانفجارات تقع على مسافات كوسمولوجية، فإن تلك الانفجارات البعيدة جداً تكون مطابقة لطاقات هائلة، تحرر في جزء من الثانية طاقة تفوق كثيراً الطاقة التي تنبثق من الشمس في عدة مليارات من السنين. لهذا السبب، فإن جزءاً واسعاً من علماء الفلك الفيزيائيين كانوا يعتبرون من المحتمل أن يكون مصدر رجْفات غاما موجوداً في مجرتنا.

أحد عناصر الجواب عن مصدر «رجْفات غاما» قدمه خلال التسعينيات القمر الصناعي كومْبتون الذي أنشأ، بفضل أداة فعالة، خريطة أولى لسماء «رجْفات غاما». وكانت المفاجأة التالية: فقد بدت هذه الخريطة موحَّدة بشكل باهر، بحيث صار من الصعب القيام بتأويل مجرّاتي. بيْدَ أن التقدم الأكثر وضوحاً منحه لنا سنة 1997 القمر الصناعي الإيطالي بيبوصاكس BeppoSAX، الذي أبرز الترابط بين بث إشعاعات غاما والبث البصري. وهو الأمر الذي دفع بالعلماء إلى إنشاء شبكة كبرى للرصْد، يدخل فيها في الآن نفسه القمر الصناعي «باتس» للكشف

عن ومضة غاما، والمراصد الكبرى الأرضية للكشف عن الجانب البصري. فبريق الانفجار يتضاءل بشكل سريع وهو من الكِبر بحيث نستطيع أن نتجه بسرعة نحو وجهة بث أشعة غاما. وإذا ما نحن استطعنا رصدها، فهي تمكّن من تحديد موقع الباثّ بدقة لامتناهية.

لقد كانت دهشة العلماء كبيرة، فالملاحظات الجديدة التي تمّ التركيب بينها برهنت وبشكل مقنع، أن «رجْفات غاما» تكشف عن كوارث في مسافات كسمولوجية، بفضل التعرف على مجرة ضيفة على «رجفة غاما»، في الموقع نفسه من السماء. وبعد هذا التعرف الأولي على المجرة الضيفة على الانفجار، أكدت العديد من الملاحظات الأخرى سريعاً المسافات الشاسعة التي تفصل بين هذه الأحداث البالغة الطاقية. وقد جاء الرصْد الذي تمّ سنة 1999 لبثٍّ بصريٍّ تم كشفه ثوانيَ فقط بعد رصد ومْضة من الإشعاع غاما، بفضل تلسكوب ذي استقلال آلي، لتمكن من توسيع دائرة هذا النمط من الملاحظات إلى شبكة من أندية علماء الفلك هو «روتس» (ROTSE). وهكذا أصبح من الممكن فجأة قياس مسافة البثّ غاما التي تقع فعلاً على مسافة العديد من مليارات السنوات الضوئية، ومن حساب ضوئها الواقعي، التي تمثل عدة مئات من

المرات الطاقة التي تحررها سيبرنوفا، وهو أصلاً أحد الأحداث الأكثر عنفاً في الكون. بيد أن أصل «رجفات غاما» ليس مفهوماً كلية، والعديد من النماذج لا تزال في مواجهة، بحيث تمسّ إما نجوماً هائلة، وفي العديد من الأحيان كتلة شمسنا، أي نظاماً من النجوم ذي نوترونات مزدوجة. وفعلاً، فإن النجوم المزدوجة أمر معروف في الكون، بحيث إن أكثر من نصف النجوم تدخل في هذا النظام المزدوج.

انطلاقاً من ذلك، فإن «رجْفات غاما»، مهما كان عنفها ومفاجآتها، لا تؤكد على اللقاءات الارتجاجية الكارثية بين المادة والمادة المضادة. بالمقابل، فإن الرابط بين «رجْفات غاما» واللفظ الكبير للمادة المضادة قد تمَّ استعادته من جديد على يدِ فرقة من الفيزيائيين النظريين المجتمعين حول الكسمولوجي الإيطالي ريمو روفيني Remo Ruffini، طارحين فكرة أن «رجْفات غاما» يمكنها أن تكشف عن الانهيار البالغ العنف لثقوب سوداء مشحونة كهربائياً، وتنتج بشكل كبير كمية كبيرة من الإلكترونات والبوزيترونات.

هل هناك مصْدر للمادَّة المضادَة في مجرَّتنا؟

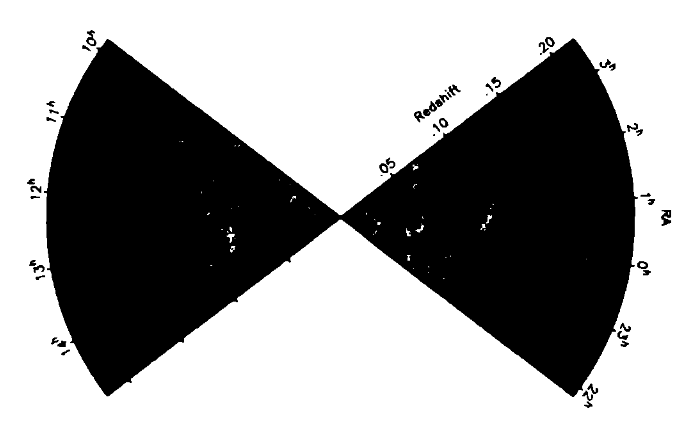
في الوقتِ الذي يبدو فيه أن لغز «رجْفات غاما» بدأ يجد له تفسيراً مقنعاً، بعد عشرات السنين من المجهودات، برز لغز جديد أفرزه رصْد القمر الصناعي «أنتغرال» لإشعاع غاما. وهذا القمر الصناعي ذو جودة التقاطية عالية ومفتوحة الزاوية، مقارنة مع الآليات السابقة، وقد أنجز خرائطية دقيقة لبث غاما في المناطق الوسطية لمجرّتنا. وبفضل دقة قياسات «أنتغرال»، فقد استطاع البرهنة على أن حصة كبرى من بث المجرة لإشعاعات غاما تعود إلى مجموعة من المصادر اللحظية (التي ليس ثمة ما يجعلنا نعتقد أنها مادة مضادة)، وإلى بثٍّ يمتد على محيط 3500 سنة ضوئية متمركز حول قلب المجرّة فإن شعاع غاما طاقته 511keV. وبالنسبة لفيزيائي مختص في الجزيْئات، فإن Raie غاما بهذه الطاقة، هي التوقيع الأكيد لإبطال بوزيترون مع إلكترون، التي تنتج فوطونيْن من 511keV (يكون واحد منها فقط يجسه الملاحظ المفترض).

أما مصدر هذا الإشعاع وأهميته، الذي يقابل حقْن الوسط المجراتي بحوالي 10^{43} بوزيترون في الثانية (أي حوالي عشرة ملايين طن من البوزيترونات في الثانية)، فهو أمر لا يزال لحدّ اليوم غير قابل للتفسير. هنا أيضاً، يمكن

للسيبرنوفات، خلال انفجاراتها الهائلة، أن تلعب دوراً في بث كميات كبيرة من الأنوية ذات الإشعاع الذري، يمكن لبعضها كالنيكل أن يتفكّك بإنتاج بوزيترون واحد في كلّ بثٍّ بيتا زائد. وإذا ما تمّ التحقق من هذا السيناريو، فإننا سنحوز هنا على تفسير تواضعي لبث هذه الأعداد الهائلة من البوزيترونات. إن تزايد دقة القياسات والمعرفة الفُضلى لنسبة انفجار السيبيرنوفات ستسمح في السنوات المقبلة من تحديد إذا ما كان إشعاع الإبطال المنتشر الذي لاحظه أنتغرال قابلاً للتفسير بشكل تواضعي، أم بالعكس أن الإنتاج الهائل للبوزيترونات، الذي كشف عنه القياس، يستدعي آلية غير معروفة لحد ذلك الوقت.

هل هناك ركام هائل من المادّة المضادّة؟

تقريباً في المكان نفسه في سلم المسافات الكونية لرجْفات غاما، يتعلق أحد الاكتشافات المهمة في العقد الأخير بملاحظة أن المجرّات تتجمع في ركام هائل يتركب في بنيات عبارة عن أسلاك ومساحات منفصلة إلى حد ما بعضها عن بعض (الشكل 10). ونحن في الواقع لا نعرف الشيء الكثير عن كمية المادة الموجودة في الوسط بين ركام المجرات، لكن نظراً لحجمها وتوزيعها، تسير الأمور كما لو



الشكل 10 : بنية الكون في شكل أسلاك

مكّنت البرامج الكبرى لمراقبة المجرّات من التدقيق المهم في بنية كوننا. وفي قبّتيْ الملاحظة من برنامج 2dF (بعض المناطق في السماء لا تخضع للمراقبة)، تتجمع المجرّات في شكل خيوط، تاركة مناطق شاسعة فارغة. وتمكّن برامج التجْسيد من استنساخ هذه البنيات، لكن فقط بإدخال مكوّنيْن مهمين ولم يتم بعد رصدهما في الكون، المادة السوداء والطاقة السوداء، باعتبار أن هذه الأخيرة تسرّع من وتيرة توسُّع الكون. المصدر: SDSS.

أن هذا الركام الهائل مستقل بعضه عن بعض. وقد يكون أحد عناصر هذا الركام مكوناً من المادة المضادة، غير أن الأقمار الصناعية الراصدة لإشعاع غاما قد لا تكون ذات حساسية تمكّنها من إدراكها. في هذا المستوى، من الواضح إذاً أننا نصل إلى حدود المنهج وأن علينا اللجوء إلى وسيلة أخرى للبحث، بالرغم من أن ألفار ودي روخولا،

وأندي كوهن وشيلدون غلاشو يعتقدون أنهم قادرون على البرهنة، مع بعد المسافة، على أن الانتشار التدْريجي للمادة والمادة المضادة في هذا الركام يؤدي إلى بث إشعاع غاما غير متناسب مع الرصد والملاحظة.

رصْد المادة المضادة بالقمر الصناعي

كيف يمكن إذاً التجريب المختلف لفكرة وجود المادة المضادة في مناطق نائية من الكون؟ تتمثل الفكرة في رصْد الإشعاعات الكونية. وبالرغم أن حواسنا لا تدرك ذلك، فإن جسمنا يتعرض كل ثانية لهجمات مائة من الجزيْئات تنتجها الإشعاعات الكونية المرتحلة في مجرتنا، والتي تتكسر على الفرْشات العليا للغلاف الجوي وتنفجر في باقة من الجزيْئات الثانوية. ولو لم يكن الغلاف الجوي يلعب دوره الحمائي، لكان جسمنا يتعرض باستمرار للإشعاع الكوني الذي ترصده مثلاً، المركبة الفضائية، ولكانت نسبة السرطان الناجم عن هذه الإشعاعات قد أدت إلى انقراض الجنس البشري. إن جزءاً مهماً من الإشعاع الكوني، ذا الطاقة الضئيلة الساقطة على الأرض، يعود إلى أن الشمس، من خلال الانفجارات التي تتم في سطحها، ترمي بكتلة هائلة من المادة التي تخفي الإشعاع الكوني

الآتي من خارج النظام الشمسي. وهكذا، فإن التغيرات التي تنتجها الرياح الشمسية طوال الزمن، وهي تصل إلى طاقة من نسبة جيغا-إلكترونوفولت GeV أي تقريباً طاقة كتلة البروتون[٥]، مهمة، وتلقّي الفرْشات العليا من الغلاف الجوي لكميات هائلة من المادة التي ترمي بها الانفجارات الشمسية، قد أدت سابقاً إلى انقطاع التيار الكهربائي في شبكة الخطوط ذات التوتر العالي في الولايات المتحدة وكندا.

وللحدّ من تأثير الشمس على الإشعاع الكوني، من اللازم الاهتمام بالإشعاع الكوني ذي الطاقة الكبرى. فللوصول إلى طاقة من قبيل TeV، أي حوالي ألف مرة طاقة كتلة البروتون، لم يعد التسْريع في النظام الشمسي كافياً والإشعاع الكوني عليه بالضرورة لكي يبلغ طاقات لها الأهمية نفسها، أن يلعب لفترة معينة ما يشبه «كرة الطاولة» المجرّاتية، حيث يربح الجزيْء تدريجياً الطاقة بفضل التماسّ المتوالي مع حيطان الطاقة التي تتحرك في المجرّة. تنجم هذه الحيطان المتحركة للطاقة أساساً من انفجار السيبرنوفات التي ترمي في الفضاء جزءاً كبيراً من كتلة نجم متى ما استنفدت إمكانيات مقاومة ثقلها نفسه.

إن مقدار المادة المضادة في الإشعاع الكوني غير معروف

بشكل جيد. وتحديده صار صعباً لأن الغلاف الجوي يجعل الأمر ضبابياً بفقدانه كليةً لهوية الجزيْء المنكسر عليه والذي يولّد باقة من الجزيْئات حين يصطدم بالفرشات العليا للغلاف الجوي. والمحاولات الرامية إلى رصد المادة المضادة في الإشعاع الكوني اصطدمت لحد الآن بهذا المشكل، باعتبار أن التجارب قد تمت بواسطة بالونات في الطبقة العليا للجوّ. ومجرد أن البالون يستطيع تحمل ثقل تجهيزات القياس يعني طبعاً أن الجو ولو كان رقيقاً يظل موجوداً، وهو ما ينجم عنه أن الجزيْئات المستكشفة ليست دائماً جزيْئات آتية مباشرة من الإشعاع الكوني، وإنما أحياناً جزيئات ثانوية، أي ناجمة عن التفاعل مع الغلاف الجوي.

إننا نعتبر عموماً أن رصد نواة وحيدة كالكاربون المضادّ قد تكون علامة توقيع لوجود عوالم المادة المضادة، وهو ما يبرز الأهمية القصوى لهذا النوع من القياسات. لكن، بالرغم من مجهودات الرصد الكبرى، لم نتمكّن لحد اليوم من التعرف على نُوى المادة المضادة في الإشعاع الكوني. فالعديد من التجارب في البالونات والأقمار الصناعية قد استطاعت رصد قسط ضئيل من البروتونات المضادة، تمَّ قياسها بشكل قريب من الدقَّة، في الجزيْئات المستكشفة، لكن هذه البروتونات المضادة يمكنها أيضاً أن تأتي من

تفاعل إشعاعات المادة الكونية مع الأداة الكاشفة نفسها، أو مع مادة الوسط البين نجمي. وهكذا نحن نعرف أن ثمة حوالي بروتون مضاد لعشرة آلاف بروتون في الإشعاع الكوني، وهذا المقدار ينخفض في الطاقة الضئيلة وغير معروف جيداً في الطاقة العليا (فيما وراء عشر مرات كتلة البروتون)، حيث يكون عنصرٌ خارج المجرَّة متوقعاً وقابلاً للمعاينة أكثر.

وللذهاب أبعد والانفلات من تلوُّث المقاييس بالغلاف الجوي، يبدو الحلّ بدهياً: من اللازم أولاً إنجاز التجربة في القمر الصناعي عوض البالون، واستعمال مساحة استكشاف كبيرة، وأخيراً الزيادة في زمن التقاط المعْطيات، المحدود عموماً في عشرات من الساعات في البالون. لكننا نواجه مشكلة عملية مهمة. فلأن الجزيئات المضادة لا تتميز عن الجزيئات إلا بشحنتها الكهربائية، ليس ثمة من حلٍّ في الممارسة إلا باستعمال حقل مغناطيسي لتحديد إذا ما كنا أمام نواة (مشحونة إيجابياً) أو نواة مضادَّة (مشحونة سلبياً)، إلا إذا أبطلت تلك الجزيئات المضادة بالمادة.

لكن، حتى التسعينيات من القرن الماضي، وفي الوقت الذي كانت فيه التجارب التي أطلقت في البالونات

تأخذ معها المغناطيس الضروري للتمييز بين المادة والمادة المضادة، لم يحقّق أي قمر صناعي هذا الهدف. ولذلك أسباب عدة: من جهة، فلكي يكون المغناطيس مفيداً في التعرف على الجزيْئات عليه أن يُفرز حقلاً مغناطيسياً قوياً. لكن لحدّ الآن فإن هذا الحقل، لنقل إنه من حوالي طيسلا Tesla (وحدة الحقل المغناطيسي)، أي آلاف المرات أقوى من الحقل المغناطيسي الأرضي، لم يكن بالإمكان خلقه إلا باستعمال بَكَرات تتخلَّلها تيارات قوية تتطلب استهلاكاً كبيراً للطاقة. بالإضافة إلى ذلك، فإن مغناطيساً ذا حقل كبير يسعى للأسف إلى التناسب مع الحقل المغناطيسي الأرضي، وهو ما يمارس فعلاً غير مرغوب فيه على القمر الصناعي الذي يكون مضطراً للصراع للحفاظ على وجهته إذا ما كان الحقل المغناطيسي في خارجه.

في سنة 1994، قام مجموعة من الفيزيائيين تحت إشراف سام تينغ Sam Ting الحاصل على جائزة نوبل بالبرهنة على إمكان استعمال مواد جديدة، أي مزيج من النيوديم والحديد والبورون لصنع مغناطيسات دائمة، لا تحتاج إلى شحن خارجي لصنع حقلها المغناطيسي. هذه المغناطيسات من القوة بحيث إذا وضعنا أحدها على قطعة من الحديد من اللازم استعمال أداة فاصلة للفصل بينهما. وهكذا تمَّ

حل مشكل استهلاك الطاقة. وقد تمَّ اقتراح المهمة AMS (المغناطيس المقياس للمادة المضادة) للمحطة الفضائية ألفا، وتمت المصادقة عليه من قِبَل الناسا في ربيع 1996، كما أنجز مرحلة أولى من البرهنة في السفينة الفضائية. وفي مرحلة ثانية، وبعد أن تمَّ تجهيز التجربة بمغناطيس ممرِّر هائل أقوى وبأدوات معززة، سوف تلتحق تجربة -AMS II بالمحطة الفضائية الدولية، للزيادة في مدة التدقيق في المقاييس المنجزة في التجربة الأولى. فمغناطيس ممرِّر هائل يمكّن بالفعل من الوصول إلى حقل أهم بكثير من الحقل الذي يمنحه المغناطيس الدائم للتجربة الأولى (AMS–I)، واستهلاكه يظل محايداً طالما ظلت الحرارة منخفضة بما يكفي كي يظل المغناطيس ممرراً هائلاً.

إن التجربة AMS–II (التي كان إطلاقها قد تعرض للتأخير بسبب انفجار السفينة الفضائية كولومبيا في 2003)، بعد أن تخلصت تقريباً من باقات الجزيئات المنتجة في الجو التي حدّت لحد الآن من حساسية التجارب في البالون تجاه البحث عن المادة المضادة، كانت معدَّة لتكون حساسة أكثر من تجارب البالونات السابقة بنسبة ستة آلاف إلى عشرة آلاف. وقياس سرعة الجزيئات، عن طريق الزمن الذي يُقْضى لعبور الآليات، كما قياس دفعها الذي

يقاس بفضل الحقل المغناطيسي للمغناطيس، ستمكن أيضاً من تحديد طبيعة النواة المرصودة ورؤية إذا ما كنا نلاحظ في الإشعاع الكوني أنْوية مضادة كالسيليسيوم المضاد والكربون المضاد، اللذيْن لا يمكن البتَّة صنعهما خارج عالم المادة المضادة. إن رصد ولو واحد من هذه الأنْوية سيشكل إشارة قوية جداً إلى وجود عوالم المادة المضادة، وتبعاً لملاحظاتنا عن إشعاعات غاما، إلى الوجود الأكيد للركامات الهائلة من مجرات المادة المضادة.

إن تحديد طبيعة الجزيْئات التي تكوّن الإشعاع الكوني لا يمكن أن يتم، سواء بالبالون أو بالقمر الصناعي، إلا في حدّ طاقة من بضع عشرات من GeV، وهي طاقة لا تخضع المسارات، في ما ورائها، للانحراف إلا قليلاً بفعل الحقل المغناطيسي للمغناطيس بحيث لا يمكننا قياس دفْعها بدقة. لكن، في طاقات كهذه ضئيلة شيئاً ما، فإن الحقل المغناطيسي الموجود في المجرّة يجعل الإشعاعات الكونية تأخذ شكلاً حلزونياً ويتصيَّدها بشكل شبه كامل في المجرة. وحين تصبح طاقة شعاع كوني كبيرة بشكل كافٍ، بحيث تصل بخصوص كل جزْيء طاقة كرة مضرب مرمية بسرعة 100 كلم في الساعة، أي حوالي مليار مرة الطاقة القصوى للجزيئات التي نعرف قياسها في القمر

الصناعي، يصبح الحقل المغناطيسي المجراتي من الضعف بحيث يعجز عن التحكم في جزيئات بهذه الطاقة. وهذه الأخيرة تستطيع حينها أن تقفز بشكل حرّ من مجرّة إلى أخرى عبر مسافات هائلة.

علينا إذاً الاعتراف أن بحثنا في الطاقة التي تصل بضعة جيغا-إلكترونوفولت GeV عن الجزيْئات الآتية من ركامات هائلة للمجرّات يشبه شيئاً ما مسعى الشخص الذي يبحث عن مفاتيحه تحت مصباح أرضي بالرغم من أنه يعرف بالتأكيد أنه لم يفقدها هناك. لكن بما أنه المكان الوحيد المضاء فسيقضي وقتاً طويلاً قبل العثور عليها.

هناك طريقة مبتكرة لقياس كمية المادة المضادّة في الإشعاع الكوني، ولا تتطلب إرسال قمر صناعي للفضاء، اقترحتها مجموعتان من الفيزيائيين الفرنسيين والألمان. ترتكز فكرتهم على كون القمر والشمس يخلقان ظلّاً بما أن الإشعاعات الكونية التي تتكسَّر على سطْحهما لا يمكن طبعاً أن تصل إلينا. ونظراً لوجود الحقل المغناطيسي في النظام الشمسي، فإن هذا الظل، منزاح عن الظل الذي يخلقه القمر والشمس بالنسبة للجزيئات المحايدة، مثلاً فوطونات ضوء النجوم الموجودة خلفهما. وبما أن الانحراف مُساير للشُّحنة، الإيجابية لدى البروتون أو

النواة، والسلبية لدى البروتون المضاد أو النواة المضادة، فإن انزياح ظل القمر يكون معاكساً تبعاً لكون الأمر يتعلق بجزيْء أو جزيْء مضاد. بل إن هذا الظل قد تم رصده (لكن فقط بالنسبة لجزيْئات المادة) في تجارب ذات طاقة عالية كتجارب «ماجيك» في جزر الكناري، أو «ميليغرانو» في لوس ألاموي بالولايات المتحدة الأمريكية، وهو يبرز أن مبدأ المنهج صحيح، ولو أن رصد مكوِّن ضعيف من المادة المضادة يظل تحدّياً تجريبياً رهيباً.

الباب الثالث

طرق العبور
بين المادة والمادة المضادة

مَوْت المادَّة

وفي انتظار تفْنيد مُحْتمل لما وصفناه في الباب السابق خلال إنجاز مشاريع طموحة للبحث عن المادة المضادة، علينا أن نعترف أنها تبدو غائبة بشكل ميؤوس منه في محيطنا. ولم نستطع من خلال دراسة المادة المضادة، التي أنجزتها مسرِّعاتنا بشكل واسع، أن ننجح بعد في الفهم الحق لأصل اللاتوازي بين المادة والمادة المضادة. وحتى نتقدَّم في فهمنا، لنصبحْ للحظة متفرجين، تاركين الكوْن يوضح لنا من خلال بعض الآليات بأنه قادر على حرق المادة وإبطالها. والآليتان اللتان سوف ندرسهما، أي تفكك البروتون وتبخّر الثقوب السوداء، اللتين لا نستطيع اليوم إدراكهما، تتحكمان من دون شك في مستقبل الكون في فترة بعيدة حين سيصبح هذا الأخير جامداً وثابتاً. لكن المفارقة تكمن في أن هاتين الآليتين، لكي تحدثا باحتمال مقبول، يلزم أن تكون الحرارة مرتفعة بشكل هائل، مثل تلك التي عرفها الكون في لحظاته الأولى.

ومن دون شك أن هذه الفترة هي التي شهدت انتصار المادة على المادة المضادة، وكل معلومة ولو غير مباشرة عن

هذه اللحظات الأولى تسمح لنا بفهم أصل هذا اللاتوازي.
سنرى أن مفهوم المادة والمادة المضادة ينمحي عبر تفكُّك البروتون وتبخُّر الثقوب السوداء لأن التوازي بين المادة والمادة المضادة يتم استعادته عبر هاتين السيْرورتيْن لاندثار المادة. وبعد دراسة موت المادة هذا، سنجد، كما في معادلة ديراك، الطاقات السلبية والجزيئات التي تصعد الزمن، لكن هذه المرة في إطار النسبية العامة. وأخيراً، لكي نتوّصل إلى تجريب نظرياتنا، علينا أن نتعلم التحكم في المادة المضادة كيٍ نصنع ونستقطب ذرات الهيدروجين المضاد، التي قد تمكِّن من حلّ لغز المادة المضادة.

ولكي يكون لنا الحق في الحديث عن مضمون المادة، ينبغي ألا يكون لها إمكانية للزوال من غير أن تترك أثراً؛ وإلا يمكننا أن نحبس كتلة من المادة في صندوق، لنكتشف بعد ذلك بقليل، حين نفتح الصندوق، أن قطعة المادة الذي أردنا الاحتفاظ بها قد اندثرت تماماً. بعبارة أخرى، لكي يمكن أن نتحدث عن مضمون المادة، من غير أن تكون العبارة فارغة من المعنى، يلزم وجود قانون للمحافظة.

نحن نعرف العديد من قوانين المحافظة. ونعتقد أن بعضها مطلق لأنه يتعلق بجوانب مركزية في نظرياتنا بحيث إذا ما مسسناها سوف نحطم أسس الفيزياء. ذلك

هو حال المحافظة على الشحنة الكهربائية. لننطلقْ مثلاً من كتلة من المادة محبوسة في صندوق وتملك شحنة عامة لإلكترون. هذا لا يعني بالضرورة أن ثمة في الصندوق إلكتروناً واحداً. بالمقابل، نحن نعرف، أننا طالما لم ندخِل في الصندوق مكوّنات أخرى، فإن مجموع الشحْنات لكل مكونات الصندوق ستكون مساوية للشحنة الأصل، في المثال الذي أخذناه بإلكترون.

وإذا ما نحن جمعنا الكمّيات التي نعتقد أن قانون المحافظة عليها مطلق، فإن أغلب الفيزيائيين يتفقون على أننا يمكننا أن نضع فيها الشحنة الكهربائية، واللحظة الحركية والطاقة والدفْع. وخارج هذه الكمّيات، يكون الفيزيائي مرْتاباً في القبول بالمحافظة على كميات أخرى. والسبب في ذلك يعود إلى أن الكمية حين يظل مُحافظاً عليها، فذلك أمر يعني أن قوانين الطبيعة يلزم أن تظل قارة أو ثابتة في خلال تغيُّر معين. ولكي يتم القبول أن تدخل كمية جديدة إلى سجلّ الكميات المحافَظ عليها، ينبغي إذاً اكتشاف خاصية جديدة للثبات، وهو أمر لا يمكن أن نقوم به على هوانا بالحفاظ على جمال النظرية وبساطتها.

كيف نحدِّد كمية من المادة؟

لكي نوضح أكثر هذه الفكرة، لننظرْ كيف يمكن أن نحدّد مفهوم المادة مع الحفاظ في أذهاننا على كون شيء من المادة يملك «حَمولة مادة» تكون مناقضة لحَمولة «الشيء المضادّ»، أي للشيء نفسه، لكن مع تعويض كل الجزيْئات بجزيْئاتها المضادة. ولكي نحدّد قانوناً للمحافظة، لنبدأْ بالنظر إلى ما استطاع من حولنا أن يقاوم عوادي الزمن. فقطعة ذهب مثلاً، تمثل مادة لا تتغير ولا تبث تقريباً أي إشْعاع ذرّي. والبروتونات والنوترونات المخبوءة داخل تلك الأنْوية المستقرة تبدو هنا خالدة.

وكوننا موجودين يعني أن المادة تتمتع بثبات فائق. وإذا كانت مثلاً مدة حياة بروتون تحت عشرة ملايين مليار سنة (10^{16} سنة)، فإن أثر تفكك بروتونات جسمنا سيكون كافياً بحيث لا يصل الواحد منا أبداً لسن الرشد، بما أن عدد أمراض السرطان التي سيسبِّبها ذلك الإشعاع الذري ستكون كثيرة. لنبلورْ الآن فرضية أن البروتون والنوترون هي أشياء قارة في الأنْوية، ولكي نقيس كمية المادة في شيء ما، نقوم بجمع عدد البروتونات وعدد النوترونات التي تكوِّنه. وهكذا نحدد ما نسميه العدد البرْيوني. يمكننا أيضاً تعميم هذا المفهوم على الجزيئات غير القارة، غير أننا

لن نتناولها هنا.

أما بصدد المادة المضادة فسنحسب بطريقة مشابهة النوترونات المضادة والبروتونات المضادة؛ لكن في كل مرة، عوض أن نحسب +1 بالنسبة لنوترون أو بروتون ما، سنحسب −1 بخصوص كل بروتون مضاد وكل نوترون مضاد، بشكل شبيه بالشحنة الكهربائية. وما نسعى للقيام به هنا، هو حساب الكوارْكات باعتبارها الأشياء الأكثر أساسية، وقسمة العدد على ثلاثة. لكن بما أن لا أحد رأى كوارْكاً حراً، وأن الجزيئات القارة تحتوي على ثلاثة كواركات، فمن الأفْيد القيام بما قمنا به.

يمكننا اعتبار أن المادة التي تحيط بنا، على الأقل في مقاربة أولى، يمكن أن يتم جرْدها بهذه الطريقة. بيد أننا نسينا لحد الآن في جرْدنا الإلكترونات والنوترينوات، بالتأكيد لأن مساهمتها، بالعلاقة مع المادة التي نرى على الأرض، تبدو نافلة، أي بنسبة تقل عن واحد لألف من كتلة الأشياء. مع ذلك، يبدو من الحكمة القيام بجردٍ ثانٍ يأخذ بعين الاعتبار اللبتونات والإلكترونات والنوترينوات، بعد الكواركات. ولو كان للنوتْرينوات كتلة، كانت ستمثل وزناً كبيراً في الكون، وسيكون عدم أخذها بعين الاعتبار مسّاً بمبدأ الجرد وبهدفنا منه. وإذاً،

كلما أبصرنا بإلكترون، سنزيد +1 للعدد اللبتوني، والأمر نفسه بخصوص النوترينو. وطبعاً، سننقص 1 من كل بوزيترون ومن كل نوترينو مضاد. ها نحن إذاً لدينا عددان لتحديد المادة: العدد البريوني والعدد اللبتوني، اللذيْن يمكننا أن نفترض أنهما يخضعان للمحافظة بشكل منعزل، باعتبار أن البروتون قار جداً ولا يتفكك، أو هو يتفكك في النادر إلى جزيْئات أخفّ. إن التعامل بهذا الشكل يمكِّن من احترام بناء عالم الجزيئات باللبتونات والكواركات، وهو العالم الذي فصَّلنا التحليل فيه في الباب الأول من هذا الكتاب، ويبدو أن بإمكاننا الوقوف عند هذا الحد، بما أن البوزونات، كما الفوتون، التي تحمل معلومات القوى، هي مادة ومادة مضادة في الآن نفسه.

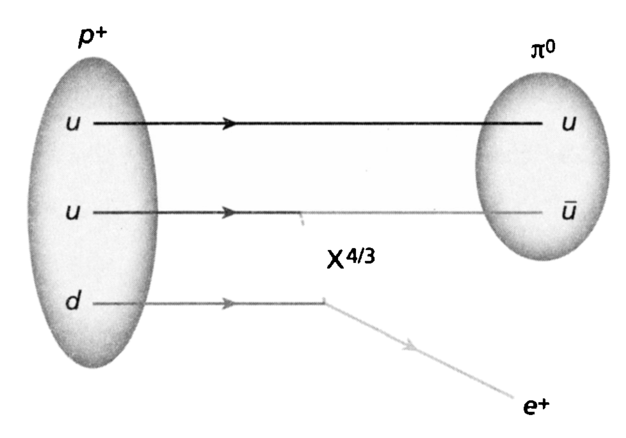
إذا كانت طريقة جرْدنا تبدو طبيعية، بالرغم من أنها تدخِل معياريْن إضافيَّيْن (بل أربعة إذا اعتبرنا أن الأسر الثلاثة من اللبتونات تبدو كما لو أن لكل واحدة منها نوترينها)، فإن تلك الطريقة تصطدم مع ذلك بصعوبتيْن أساسيتيْن. من جهة، تنزع الجاذبية الكثير من الأهمية عن مسعانا، بما أننا نمنح المضمون نفسه من المادة للنجم نفسه في بداية حياته ونهايتها، في الوقت الذي تكون فيه قد فقدت في انهيارها الجاذبي جزءاً من كتلتها. سنرى في ما بعد أن

المشكل أعوص من ذلك لأن المادة تنتهي بأن تتعرض كلية للحرْق على يد الثقوب السوداء. من جهة أخرى، يبدو أن التفاعلات الضئيلة والقوية والكهرُمغناطيسية ليست في الحقيقة سوى القوة نفسها، بالرغم من أن ذلك لا يغدو واضحاً إلا في الطاقة العالية جداً. بل إن مفهوم مضمون المادة ينمحي في الوقت نفسه للتمييز بين الأسَر وبين المادة والمادة المضادة.

تفكُّك البَروتون

لقد أشرنا إلى أن التفاعلات الضعيفة والكهرمغناطيسية تتحدان في الطاقة العليا في تفاعل وحيد ذي كهْربة ضعيفة، وأن التفاعل القوي بالتأكيد يقوم بالشيء نفسه في الطاقة العالية. بيد أن الحديث عن وحدة يفرض حالاً وجود مسالك المرور بين الكوارْكات واللبتونات.

وهذه المسالك لها مزيَّة تتمثل في أن لا ضرورة البتَّة للقيام بقياسات معزولة للأعداد البرْيونية واللبتونية بما أن الأسرتيْن توجدان الآن مجمَّعتيْن في أسرة كبيرة واحدة. فالحل لمشكل قياس كمية المادة يمكن أن يبدو بدهياً لأنه يكفي الآن الجمع بين أعداد الإلكترونات والبروتونات والنوترونات. هل الأمر صحيح؟



الشكل 11: تفكك البروتون

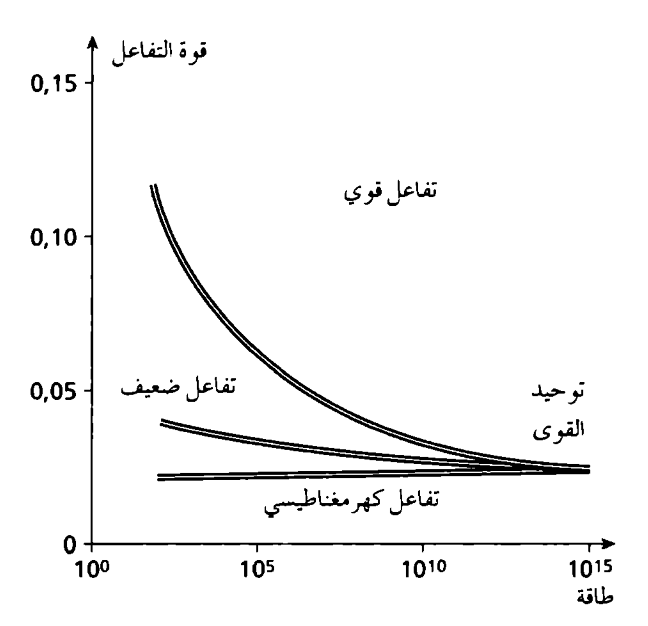
تتكهّن نظريات توحيد التفاعلات الضعيفة والقوية والكهرمغناطيسية بتفكك البروتون. وهذا التفكك يتم بواسطة جزيْئات بالغة الثقل كما هو هنا حال البوزون X، بكتلة بين 1015 و GeV 1016. يمكن تبادل هذا الجزيء من تحويل كواركيْن (هنا الكوارك u و d) إلى كوارك مضاد وبوزيترون. وبالرغم من هذا التفكك الذي تتكهن به النظرية، فهو لم تتم ملاحظته تجريبياً. المصدر: المدرسة العليا (ENS) بباريس.

بل خطأ! فحين تستطيع التفاعلات الثلاثة في الأخير من التوحد في طاقة عليا، فذلك لتمكّن البروتون من التفكك إلى مادة مضادة لا إلى مادة. وهكذا، في النموذج الأبسط، نتوقَّع أن يتفكك البروتون إلى بوزيترون وجزيْء من المادة المضادة وإلى ميزون p°، الذي هو جزئيهُ المضاد[9]. عموماً، لقد حوّلنا إذاً جزئياً من المادة إلى جزيء مضاد. وتوحيد القوى، مهما كانت أناقتها، تمنح الإمكان لتحويل

كمية المادة الموجودة في الكون ولتنحيتها كلية من الوجود (على المدى الطويل).

ما الذي نعرفه اليوم من تفكك المادة هذا؟ فلفهم الأهمية التي سيأخذها ذلك، يمكننا البدء بتأمل الكيفية التي تمارَس بها مختلف التفاعلات بالنظر إلى الطاقة بين الجزيْئات. فإذا كانت التفاعلات الثلاثة لا تشكل إلا تفاعلاً واحداً ذا طاقة عليا، فعلى قوى التفاعلات أن تتجه الواحدة نحو الأخرى بطاقة معينة. وذلك هو ما يحدث في الواقع على حسب ما يمكننا الحكم به. وفعلاً فإن قوة التفاعلات تتغير تقريباً بالطريقة المشار إليها في الشكل 12. وكما نرى، فإن تقاطب القوى الثلاث للتفاعل، يوجد في طاقة بنسبة 10^{15} GeV. بيد أن هذه الطاقة الهائلة أعلى بألف مليار مرة مما تأكدنا منه اليوم في مُسرِّعاتنا الأكثر قوة. يلزم مسرِّع من حجم النظام الشمسي كي نأمل الوصول إلى هذه الطاقة. وإذا نحن أبحنا لأنفسنا هذه القفزة الهائلة عبر المجهول، فإن قيمة طاقة التوحيد تمكن من تقدير قيمة مدة حياة المادة. وفعلاً، كلما كان حاجز الطاقة الضرورية القفز عليه لإنجاز التفكك مرتفعاً، كلما كانت مدة الحياة طويلة. فالقيمة المحصل عليها، وهي بنسبة 10^{31} سنة، هائلة بالنظر إلى العمر الحالي للكون.

لا يتعلق الأمر طبعاً بانتظار 10^{31} سنة كي تتفكك كل البروتونات في نهاية عمرها الطويل. فمدة الحياة ظاهرة سكونية ولعبة رهان، تمكّننا من أخذ قطعة كبيرة من المادة، تملك مثلاً 10^{32} بروتوناً ونوترونا، وانتظار سنة كي نلاحظ إذا ما كنا، عند نهاية هذه المدة، سنشهد تفككاً لعشرة من

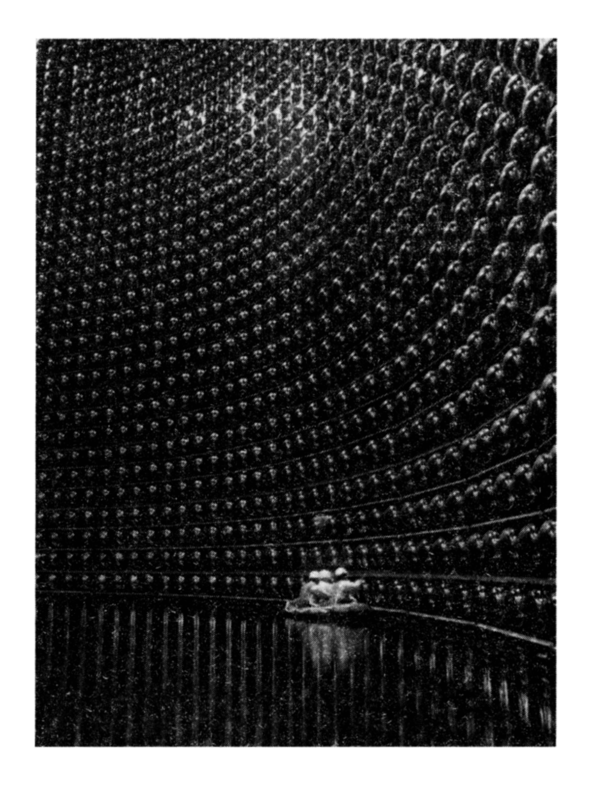


الشكل 12: تجاذب التفاعلات الثلاثة

إن الطريقة التي تتجاذب بها التفاعلات الثلاثة، الضعيفة والقوية والكهرُمغناطيسية حين ترتفع الطاقة، تؤدي إلى تجمع هذه القوى الثلاث في قوة واحدة ذات طاقة عالية جداً، حوالي 10^{15} أو 10^{16} GeV. المصدر: مجلة «عالم العلوم»، 1985.

البروتونات والنوترونات. فمراقبة 10^{32} من البروتونات ليس ممكناً لأسباب عديدة. من جهة أخرى، يمثل ذلك كمية كبيرة جداً من المادة، أي حوالي 150 طناً. بالإضافة إلى ذلك، فإن الإشعاع الكوْني يعرِّضنا إلى هجمات لا تتوقف من الجزيْئات. لا مجال لنسعى إلى رصد بعض التفككات في السنة في الوقت الذي تأتي فيه مئات من المليارات من الجزيئات لتصطدم بالمكشاف. في بداية الثمانينيات، أجريت العديد من التجارب، خاصة في الولايات المتحدة واليابان وفرنسا، لتحمي نفسها من الإشعاع الكوني في مخابر تحت الأرض، تحت مئات الملايين من الأطنان من الصخور، كي ترصد تفكك البروتون. وبالرغم من العديد من السنوات في الرصد، وبالرغم من حساسية تلك التجارب الكبرى، انتهت تلك التجارب من غير أن ترصد أي مؤشر لعدم استقرار المادة، تاركة لغز التفكك كاملاً مكتملاً.

وبعد الجيل الأول من التجارب، بنى الفيزيائيون اليابانيون مكشافاً ذا كتلة عامة من 500 طن من الماء البالغ الصفاء، يسمى «سوبيركاميوكاد» (الشكل 13)، مصفَّحاً بآلاف المضعِّفات الضوئية وقادر على التقاط بث طاقي مائة مرة أضعف من تفكك البروتون.هذا المكشاف،



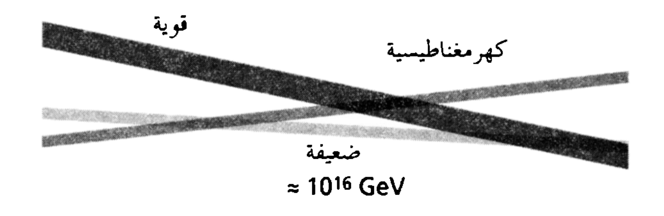
الشكل 13: تمَّ بناء المكشاف «سوبر كاميو كاند» في منجم كاميو كا باليابان، لحمياته من الأشعة الكونية، وهو مكوّن من أسطوانة من 50000 من الأطنان من الماء الخالص الصفاء، وجدرانه الداخلية مغلفة بالآلاف من المضعّفات الضوئية. وإذا ما حدث تفكك لبروتون، فإن الضوء الذي تبثه آثار التفكك يتم التقاطه من قبِل المضعّفات الضوئية في بضع أجزاء من مليار من الثانية، ويمكّن من إعادة بناء بالغة الدقة لتمظهر التفكك. وبالرغم من الكتلة الهائلة لهذا النوع من المكشافات، فهو لم يبرهنْ بعد على تفكك المادة التي تنبأت بها نظرية التوحيد. المصدر: مساهمة سوبر كاميو كاند.

الذي تم إيقافه جزئياً لمدة سنوات، بعد الانبجاس المتوالي في نونبر 2001 للـ 11000 من المضعّفات الضوئية التي كانت تغطي ذلك المكشاف الهائل، تم إعادة بنائه سنة 2006.

بالرغم من تزايد كتلة هذا المكشاف من الجيل الثاني، لم يتم رصد أي إشارة لتفكك النوكيونات (بروتون ونوترون) بالرغم من أن الحساسية الكبيرة تصل الآن لما يقرب ألف مرة أكبر من مستوى التفكك الذي تنبأت به نظريات التوحيد.

وبالرغم من عسْر المشكل التجريبي، لم يستنكف الفيزيائيون عن رصد تفكك المادة. فمع دقة الحسابات النظرية والتجارب المتنامية، تم إدراك أن تجاذب التفاعلات الثلاثة، الضعيفة والقوية والكهرُمغناطيسية، لم تكن جيدة كما تمَّ تصور ذلك في الأول (الشكل 14). فهل كان من الضروري أن نستنتج من ذلك أن وحدة القوى كانت فقط أمراً ظاهراً؟

قام وقتها الفيزيائي الرياضي الأمريكي إيد وايتن، وكان حينها بمعهد الدراسات المتقدمة في برنسيتون، هناك حيث كان يشتغل أينشتاين في منفاه بأمريكا، بملاحظة أن وجود عالم مرآة ثان من الجزيْئات، هي الجزيئات الفائقة التوازي، التي تكهَّنت بها عدد كبير من النظريات التي



الشكل 14: لقد تمّ الانتباه في السنين الأخيرة إلى أن التفاعلات القوية والضعيفة والكهرُمغناطيسية لا تتجاذب كلية لتلتقي في نقطة محددة، كما كان يُعتقد ذلك، بل إنها تتقاطع مشكلةً مثلثا. ويُستعاد اللقاء في نقطة واحدة إذا نحن افترضنا وجود جزيئات فائقة التوازي مع كتلة تتراوح بين 100 و1000 جيغا–إلكترونوفولت تقريباً. المصدر: المدرسة العليا للأساتذة بباريس.

تمكّن من توحيد الجاذبية مع القوى الأخرى الضعيفة والقوية والكهرُمغناطيسية، يسمح باستعادة تجاذب دقيق. وباتباع تحليل وايتن، ندرك أن توحيد القوى الذي يتم بفضل التوازي الفائق، إذا ما برز حين يتم التوحيد الكهربي الضعيف، يمكّننا من تجاذب للتفاعلات لا يقع في نحو 10^{15} GeV، وإنما في مستوى طاقة قريب من 10^{16} GeV. وبما أن مدة حياة البروتون متغيرة مثلها مثل القوة الرابعة لكتلة التوحيد، فإن تفكك البروتون يكون حينها من 1000 إلى 10000 مرة أبطأ مما تركتنا نعتقده الحسابات الأولى.

والمنظرون يذكرون بأن هذا التصويب يفسر لأيّ سبب لم يرصدوا تفكك البروتون في كشافاتهم ذات الآلاف من الأطنان. وسيكون تفكك المادة عندها ممكنَ الرصد من خلال جيل جديد من التجارب، بكمية أكبر بكثير من كمية «سوبركاميوكاند» بالرغم من طابعها الهائل. وعلى كل حال يعتزم المجربون، في اليابان (مع «هيبيركاميوكاند») كما في أوروبا (بمشروع ميغاتون)، صناعة مكشافات بكتلة هائلة، من نسبة مليون طن، أي 20 مرة أكبر من حجم «سوبركاميوكاند»، ستمكّنهم من أن يدرسوا بدقة وفي الآن نفسه تفكك المادة وتفاعلات النوترينوات الجوية والشمسية.

الاحْتكارات المغناطيسية باعتبارها حافزاً على تفكُّك المادة

بالشكل نفسه، الذي توجد به شحنة كهربائية هي شحنة الإلكترون، لا شيء يمنع مبدئياً من أن توجد أيضاً شحنة أولية مغناطيسية، أو احتكار مغناطيسي. بعض النظريات التوحيدية للقوى تتنبأ بوجوده، غير أن جسّه قد قاوم لحدّ الآن كل المجهودات المبذولة للتعرف علي وجوده، بالرغم من جسٍّ ممكن لم يتم توكيده، قام به سنة

1982 الفيزيائي الأمريكي بلاس كابريرا Blas Cabrera في ستانتفورد. ومنذ هذا الإعلان الأول، تم إنجاز تجارب كبيرة المدى، كما التجربة الكبرى «ماكرو»، بمساحة تبلغ عدة مئات من الأمتار المربعة من المكشافات، محمية من الأشعة الكونية بأكثر من ألف متر من الصخور في مخبر «غران صوسو» تحت الأرض بإيطاليا. إن كون تجارب من الحساسية الكبيرة هذه، لم تنجح مع ذلك في جسّ احتكارات بالرغم من سنوات طويلة من الرصد، يمنح انطباعاً سيئاً عن استعمالها في المستقبل. بيد أن الفيزيائي الروسي فاليري روباكوف Valery Rubakov قد لاحظ أننا لو كنا نعرف كيف ننتج الاحتكارات المغناطيسية التي تنبأت بها نظريات التوحيد، فإن تلك الاحتكارات يمكنها قبلياً أن تشتغل باعتبارها محفزات لتفكك المادة، بحيث تنتج المادة المضادة تبعاً لنظريات التوحيد. وكما هو أمر أيّ محفز أو وسيط، فإن الاحتكار المغناطيسي لا يتغير مع تفكك المادة ويمكن استعماله من جديد بعد أن يكون قد تسبب في تفكك، كي يحفز تفككات أخرى جديدة، وهو ما يمكن أن يوفِّر مصدراً لا ينضب من الطاقة. يمكننا تقدير أن غراماً من الاحتكار المغناطيسي نفرض عليه التحرك في المادة بواسطة حقول مغناطيسية يكفي

لتوليد قوة من بضعة ميغاواط. هذه الجزيْئات، وهي مشحونة مغناطيسياً، يمكنها قبْلياً أن توجه بسهولة، في الوقت الذي يمكن فيه التحكم في إنتاج الطاقة ووقفها بسهولة متى ما حذفنا مساعدة المادة في جوار الاحتكارات.

وهكذا، إذا كنا لا نعرف اليوم إنتاج أي احتكار مغناطيسي، فإن فهم آليات إنتاجه من الأهمية بمكان، باعتبار أنه سيفتح الطريق للمرور بين المادة والمادة المضادة، مانحاً إياناً استقلالاً طاقياً شبه كلي، وهو ما سيشكل أحد اكتشافات البشرية الأكثر أهمية.

تبخُر الثقوب السوداء، ونهاية المادة

المشكل الثاني الأساس الذي يشير إلى أن مفهوم العدد البارْيوني أو مضمون المادة ليس مفهوماً مطلقاً، نابع من اكتشاف باهر مرتبط بفيزياء الثقوب السوداء. وقد أشرنا أن النسبية العامة لأينشتاين تصف الطريقة التي بها تلوي المادة الزمن الفضاء. وحين يكون المنحنى كبيراً بحيث يبدو الفضاء كما لو أنه ينغلق على نفسه ولا يترك شيئاً ينفلت منه، آنذاك نتحدث عن ثقب أسود.

إن تاريخ تبخر الثقوب السوداء، وهو متناقض

في ما يبدو، بدأ تقريباً حين اكتشف الفيزيائي الشاب جاكوب بيكينشتاين Jacob Bekenstein، تلميذ جون ويلر في بداية السبعينيات، أن من المستحيل تحديد العدّ الباريوني لثقب أسود. وفعلاً، لا شيء يمنع في ما يبدو بأن بالإمكان التخلص في ثقب أسود من كل ما نريد، أي المنتهي في المادة أو المادة المضادة، وحين يختفي كل ذلك لا يمكّننا ما نستطيع رصده من الخارج من الرجوع إلى محتوى الثقب الأسود. وهكذا تبدو الثقوب السوداء مثل «قمامة كونية».

إن الخصائص الوحيدة القابلة للملاحظة المتعلقة بالثقب الأسود، والتي من المستحيل إخفاؤها، هي شحنته الكهربائية، ولحظته الحركية التي تقيس دورانه وكتلته، باعتبار أن هذه المقاييس مرتبطة بقوانين المحافظة. أما التفاصيل الأخرى المتعلقة بتكوين الثقب الأسود وتاريخه فهي غير مُتاحة لنظرنا. يلخص جون ويلر، وهو مبتكر اسم الثقب الأسود، هذه الخاصية في عبارة: «الثقوب السوداء صلعاء». في هذه الشروط، يكون الحديث عن محتوى المادة المضادة للكون لا معنى له باعتبار أننا إذا ما قرّرنا في عصر معيّن أن نقوم بجردٍ للمادة في الكون، لا يمكن لنا أن نصعد لتكوين الثقوب السوداء الموجودة

سلفاً. وبما أننا نعتقد في الوجود الأكيد لثقوب سوداء ذات كتل كبرى، تكون ملتهمة للنجوم في قلب العديد من المجرات، وأن هذه الثقوب تكون ممثلةً لجزء لا يستهان به من مادة الكون، فإن أي شخص يرغب في تحديد محتوى مادة الكون لا يمكنه أن يقوم بذلك إلا بعدم يقين كبير، بما أن الكتلة فقط لا مكونات الثقب الأسود هي التي يمكن مُعاينتها من الخارج.

سوف يقوم بيكينشتاين نفسه بالكشف عن جانب أكثر إبهاراً من الجاذبية. فقد كان الفيزيائيون جيمس باردين James Bardeen وبراندون كارتر Brandon Carter وستيفن هاوكينغ Stephen Hawking قد لاحظوا بالفعل أن قوانين تطور الثقوب السوداء تعبر عن نفسها بطريقة شبيهة بقوانين الدينامية الحرارية. والحال أنه يوجد في هذه القوانين المبدأ الثاني الذي يعتبر بشكل ما قانون مورفي في الفيزياء، القائل بأن كل شيء لا يمكن أن يصبح إلا أكثر فأكثر فوضى. تكمن عبقرية بيكينشتاين في افتراض بأن الأمر أكبر من أن يكون تناظراً أو صدفة، وإنما يتعلق بهوية، ويلزمنا أن ننسب لكل ثقب أسود حجماً يميّز فوضاه. واسم هذا القياس في اللغة العلمية هو القُصور الحراري. لكن ما إن يتحدث الفيزيائيون عن القُصور

الحراري والفوضى، فإنهم يعرفون أن الحرارة ليست ببعيدة[10]. لكن كيف يمكن الحديث عن حرارة الثقب الأسود، التي تفترض الحرارة التي يبثها جسم معين، بما أنْ لا شيء يمكّننا من الخروج منه؟

خلال دروس مدرسة «هوش» في صيف 1972، في جبال الألب الفرنسية، حيث قدم بيكينشتاين فرضيته القائلة بأن الثقوب السوداء تملك حقيقة قُصوراً حرارياً، انتبه الكل سريعاً لهذا التناقض الذي تعرض كثيراً لنقد لاذع من قبل براندون كارتر وستيفن هاوكينغ، اللذيْن كانا هما أول من لاحظ التماثل الغريب لقوانين تطور الثقوب السوداء مع قوانين الدينامية الحرارية. ومن سخرية الأقدار، سيكون هاوكينغ هو الذي سيقوم بعد سنتين بالبرهنة على أن بيكينشتاين كان على حق في افتراض أن الثقوب السوداء تملك حرارة وتبث من ثم الطاقة، بالرغم من أن هذا البث للطاقة، الذي يسمى عادة إشعاع هاوكينغ، يكون في أغلب الأحوال بالغ الضعف بحيث من المستحيل قياسه. ففي حال ثقب أسود بحجم الشمس مثلاً، يكون زمن التبخر بنسبة 10^{66} سنة، وهو زمن يتجاوز العمر الحالي للكون، الذي يصل إلى 10^{10} سنة، بحيث إن كل شيء يتم بالنسبة لنا كما لو أن الثقوب السوداء كانت سوداء كلية.

بيد أن النتائج النظرية لهذا التبخر للثقوب السوداء ذات أهمية كبرى. فهي تعني أن مفهوم المادة يفقد معناه كليةً. وفعلاً، فإذا كان نجم من حجم الشمس عشر مرات ينهار تحت ثقل وزنه ويغدو ثقباً أسود، فإن مصيره النهائي سيكون في التحلُّل عبر الإشعاع الحراري. لكن حين يشع جسم ما بالحرارة، على الأقل في المستويات الحرارية العادية، فهو في الواقع لا يبثّ غير الفوتونات. وبما أن الفوتونات هي جزيئاتها المضادة، فإن كل أثر لمحتوى المادة التي تشكل الثقب الأسود تنمحي ما إن يكون قد تبخَّر. هل يمكننا حقاً الحديث عن محتوى مادة نجم ما إذا لم يكن لهذا المفهوم من معنى من اللحظة التي ينهار فيها النجم تحت ثقله؟

طبعاً، إزاء أزمنة هائلة كتلك التي ذكرنا عن تبخر ثقب أسود لكتلة شمسية (10^{66} سنة)، نرغب في القول إن نتائج هذه السيرورة غير قابلة حقاً للرصْد. لكن الأمر ليس بالضرورة كذلك: فإذا كنا قادرين على تكثيف كمية من 10^{13} كلغ تساوي كتلة جبل في شكل ثقب أسود، فسيكون لهذا الأخير حجم مكرسكوبي وأيضاً إشعاع باهر. يمكننا إذاً أن نحسب أن إشعاع هاوكينغ لثقب أسود كهذا، سيشبه قوة عشر محطات نووية وأن هذا الإشعاع يمكن

أن يدوم أكثر من عشرة مليارات من السنوات، من غير إنتاج للنفايات النووية لأن الإشعاع المبثوث يكون في شكل أشعة غاما. وبالرغم من عدم قدرتنا على التحكم في الثقب الأسود فمن اللازم وضعه حول الأرض كي يمكن استعماله كمصدر للطاقة، ونحن نرى أن ما كان يبدو كفضول معرفي يمكن أن تكون له نتائج عملية كبرى لو كنا قادرين على تجاوز عقبة استقرار المادة.

سهم زمن الجاذبية

ثمة جانب صادم للفيزيائي يتمثل في أن هذا التبخر لا يمكن أن يتم إيقافه في التجربة بل فقط تأخيره. بعبارة أخرى، هو لا مردّ له، ويمثل من ثمَّ «سهم الزمن». فخلال تبخره، تزداد فوضى الكون الخارجي لأن الثقب الأسود يحترق. ومع انخفاض حرارة هذا الاحتراق، فإنه يقابل بثّ عدد كبير من الفوتونات ومن ثم ازدياداً كبيراً للفوضى. ومع تقدم تبخُّر ثقب أسود، علينا أن نحتفظ بأثر عدد كبير جداً من الجزيْئات إذا رغبنا في وصف الكون بالدقة نفسها دوماً.

إذا كان إنسان الشارع لن يندهش بتوكيدنا أن الفوضى تزداد حدة، فإن الفيزيائي يظل مصدوماً باعتبار أن تبخر

الثقوب السوداء يشكل المثال الوحيد في الفيزياء، حيث من المستحيل تفادي تفاقم الفوضى في السيرورات الميكْروسكوبية. هذه السيرورات الميكروسكوبية كافةً تحترم التوازي بين الماضي والمستقبل[11] وتترك كمية الفوضى كما هي. ولوصف المفارقة الناجمة عن إشعاع هاوكينغ، سيتحدث الفيزيائي عن خرق الأحادية والزيادة في القصور الحراري[12]. ومنذ أكثر من عشرين سنة، والفيزيائيون يسعون إلى مداورة الثورة التي تشكلها آلية تبخر الثقوب السوداء أو إبطالها، غير أن هذه الأخيرة لا زالت تقاوم هذه المحاولات لحدّ اليوم بالكثير من الثبات، إلى حد أن أغلبية الفيزيائيين يوافقون اليوم على أن هذه الظاهرة من الاحتراق النهائي تبدو قدَرية.

نعرف أن الجاذبية هي آلة تحرق المادة في قلب النجوم. وهكذا فبالإيقاع الحالي، تتخلى الشمس في شكل حرارة، أي في شكل فوتونات ونوترونوات، عن خمسة ملايين طن من المادة في الثانية، أي ما يعادل حجم الأرض في ما يناهز 40 مليون سنة. وما يوضحه بيكينشتاين وهاوكينغ هو أن ذلك الاحتراق يستمر حتى يحترق رماد النجوم ويتحول إلى حرارة، أي إلى فوتونات هي جزيْئاتها المضادة، بحيث يختفي بذلك كل أثر للتكوين الأصلي للكيان السماوي.

لقد خضعت نتيجة حدْس بيكينشتاينن الذي دقَّقه تحليل هاوكينغ سنة 1974، للتعزيز الكبير على يد محلّلين كثيرين ساروا في الاتجاه نفسه. فبعد عشر سنين من فرضية بيكينشتاين، برهن الفيزيائي فوشييش زوريك Wojciech Zurek، من جامعة لوس ألاموس، أن القصور الحراري (أي قياس فوضى) الإشعاع المبثوث طيلة تبخر الثقب الأسود تناسب جيداً مقياس القصور الحراري الذي اقترحهه بيكينشتاين وهاوكينغ. من جهة أخرى، في سنة 1996، قام أندرو سترومنغر Andrew Strominger من جامعة سانتا بربارا، وكومرون فافا Cumrun Vafa، من جامعة هارفارد باستعمال نظرية الحبال بخمسة أبعاد لقياس القصور الحراري للثقوب السوداء، التي تسمى «القصوى» بالنظر إلى أنها في الحدّ بين الثقب الأسود والنظام المرئي من قبل ملاحظين خارجيين. هنا أيضاً، أكد سترومنغر وفافا أن القصور الحراري الذي اقترحه بيكينشتاين وهاوكينغ هو القصور الحراري الثرموديناميي الذي يقابل فوضى تعقد النظام المدروس.

إن الرابط بين الجاذبية وسهم الزمن يبدو الآن مؤكداً من الناحية النظرية، بالرغم من الطريق الطويل المتبقي

لفهم هذا الرابط. وهذا الرابط يدعو الآن إلى البحث إذا ما كانت المادة المضادة في نظرية أينشتاين للجاذبية تبدو هي «المادة التي تصعد الزمن».

الباب الرابع

أيُمكن أن يكون للمادَّة المُضادَّة كتْلة سالبة؟

تحذير

يلزم تحذير القارئ هنا أننا ندخل في مجال التكهّنات. فإذا كان بعضهم قد يصاب بالرعب من الدخول في هذه المجاهيل، فإن المؤلف يتمنى أن تكون للقارئ روح الاكتشاف أقوى من الخوف، وأن يتتبّعه بعقل ناقد وبلهفة في هذا الاستكشاف. في الطبعة الأولى لهذا الكتاب، التي صدرت سنة 1996، لم نكن قد رصدنا تسريع توسع الكون، لأن الملاحظات الأولى تمت سنة 1998، والقليل من البراهين كانت تؤكد إمكانية وجود جاذبية نابذة répulsive مشتغلة في الكون. لقد صار المشهد التجريبي اليوم مختلفاً، مع وجود العديد من المجموعات المنسجمة من القياسات التي تؤكد الملاحظات الأصلية المنجزة سنة 1998. وهكذا، فإن كان ما سنصفه في ما سيلي عبارة عن تكهنات، وصار اليوم من الطبيعي البحث في جانب المادة المضادة عن تفسير للجاذبية النابذة المدهشة التي تمت ملاحظتها في الكسمولوجيا.

المادّة التي تصْعد الزمن

رأينا آنفاً أن ديْراك، منذ بداية دراسته للمادة المضادة، قد لاحظ أن الحلول التي تفسر المادة المضادة تقابل في معادلاته قلب وجهة الزمن بالنظر إلى حلول المادة. فمقابل كل حل طاقي موجب يمثل جزيئاً من المادة، ثمّة حل سالب. وبما أن الزمن والطاقة هما ما نسميه قياسات مصرَّفة، حيث إن تغيُّر علامةِ أحد القياسيْن يمكن أن يخفيه تغيُّر علامة القياس الثاني، فإن الجزيئات ذات الكتلة السالبة التي اكتشفها ديراك في معادلاته يمكن اعتبارها أيضاً جزيئات تصْعد مسير الزمن.

بعد ذلك بعشرين سنة، سوف يقوم جون ويلر ورتشارد فينمان Richard Feynman بتعزيز هذا الرابط بين المادة المضادة وقلب الزمن. وقد طور فينمان في تلك الفترة، بالموازاة مع عمل زملائه، منهجاً يمكّن من الحساب الدقيق للسيْرورات الكوانتية في الكهرُمغناطيسيات. وقد كانت طريقة فينمان تقوم على فكرة أن كل سيْرورة يمكن أن تعبّر عن نفسها باعتبارها جمعاً لانهائياً لكل السيرورات الأولية الممكنة. أي أن الطبيعة يمكنها تحقيق، بل هي سوف تحقق كل المحاولات الممكنة التي يمكن أن تربط

بين حالة انطلاق التجربة وحالها النهائي.

في هذه المقاربة التي تسمى اليوم المسار الكامل لفينمان، يتم حساب احتمال سيرورة ما في أن تتحقق بإباحة كافة المسارات الممكنة لكل جزيْء، ومن ضمنها المسارات التي فيها تصعد لحظياً مسار الزمن. وحين مثَّل جون ويلر لذلك المسار المتعرّج بيانياً في الزمن-الفضاء، سجل أنه قد لا يكون ثمة إلا إلكترون واحد في الكون، يبدو مساره المتعرج عبر الكون كما لو كان عدداً غفيراً من الإلكترونات والبوزيترونات (الشكل 2). وحين اكتشف جون ويلر هذه الفكرة أحس بالإثارة بحيث هاتف ريتشارد فينمان، الذي كان حينها طالباً يعد أطروحته للدكتوراه في برينسيتون، كي يجرب معه نتائج هذه الفكرة الباهرة. وفي خطاب جائزة نوبل للفيزياء[13]، يحكي فينمان هذا النقاش بينه وبين ويلر: «فينمان، أعرف لماذا كل الإلكترونات تملك الشحنة نفسها والكتلة نفسها.» «لماذا؟». «لأنها كلها هي الإلكترون نفسه. لنفترضْ أن الخطوط التي تتبعها كل الجزيْئات التي نعتبرها في العادة في الفضاء-الزمن، عوض أن لا تسير إلا قدماً في الزمن، تكون في الواقع كتلة هائلة من الخيوط المتشابكة. وحين نقطعها في الوسط لنرى الوضعية في لحظة معينة يكشف لنا القطْع عدداً هائلاً من

الإلكترونات، ما عدا أمراً صغيراً: حين يسير الإلكترون إلى الأمام في الزمن، نراه كإلكترون، لكن حين يأتينا من المستقبل، تنقلب شحنته، بحيث إن هذا الجزء من المسار يطابق بوزيترونا». «لكن يا بروفيسور ويلر، ثمة في الكون عدداً أقل من البوزيترونات منه من الإلكترونات». ظل ويلر مشدوها أمام هذا الاعتراض غير المتوقع على نظريته واقترح: «ربما كانت البوزيترونات مخفية في الأنْوية بحيث لم تعد تظهر كبوزيترونات». وأمام استحالة التقدم في النقاش أكثر، توقف الحديث عند هذا الحدّ، بيد أن فينمان استعمل في ما بعد البوزيترون كإلكترون يصعد الزمن في النظرية الكوانتية في الحقول التي بنى إحدى صيغها التي لا تزال مستعملةً لحدّ اليوم.

واليوم، من الممتع أن نسجل أن الفيزياء قد استعادت بشكل ما لحسابها الخاص فكرة ويلر: ففي نظرياته التوحيدية للقوى، كانت سبل المرور من الكوارْكات إلى اللبّتونات موجودة فعلاً وتمكّن من فهم لماذا تكون شحنة البروتون مساوية تماماً لشحنة البوزيترون. ثمة نتيجة أخرى لوحدة القوى هذه، على الأقل في الطاقة العليا، تتمثل في كوْن البوزيترون يمكنه أن يتفكك، مثلاً إلى بوزيترون مصحوب بميزون محايد. بهذا المعنى، يتخفّى

بوزيترون فعلاً في بروتون، والتوازي بين المادة والمادة المضادة سينتهي بلا شك، وبشكل حاسم، إلى أن يفرض احترامه.

لكن، إذا كانت المادة المضادة هي المادة التي تصعد الزمن، فمن العسير فهم كيف يمكن لزمنيْن متعارضيْن أن يتعايشا في الفضاء نفسه وفي المكان نفسه. من هذا المنظور، فإن نظرية الجاذبية لدى أينشتاين، أي النسبية العامة، تمكّننا من إضاءة جديدة، أدق من إضاءة ديراك. فأينشتاين وهو يصف الفضاء-الزمن باعتباره فضاء منْحنيا، تمكّن نظريته عن الجاذبية من فهم بنية انثناءات نسيج الفضاء-الزمن. كان براندون كارتر Brandon Carter، في أواسط الستينيات، هو الذي أرسى الأدوات الضرورية لهذا الفهم الجديد، القائم على الدراسة الرياضية للثقوب السوداء.

ومنذ 1916، كان كارل شفارتزشيلد Karl Schwarzschild (ومر زمن قليل بعد أن اكتشف النسبية العامة في عزّ الحرب العالمية الأولى، وكان حينها في الجيش) قد برهن على حلّ صحيح لمعادلات أينشتاين عن التوازي الكروي. غير أن شفارتزشيلد توفي بشكل مأساوي بعد ذلك بشهور على الجبهة الروسية بفعل المرض في شهر مايو 1916. غير أن الهندسة التي اكتشفها

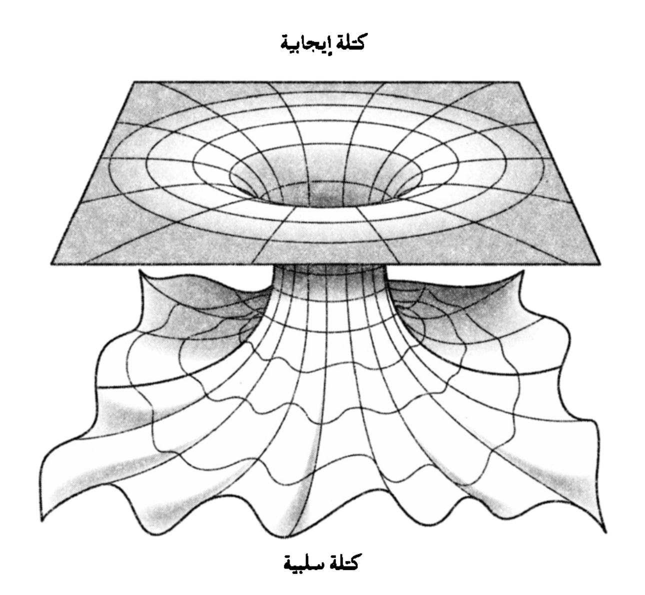
سوف تلعب دوراً بالغ الأهمية. وقد أدرك العلماء شيئاً فشيئاً أن حلّ شفارتزشيلد يصف تشوهاً في الفضاء-الزمن يتضمن في داخله ما يمكن أن نسميه اليوم ثقباً أسود، أي منطقة في الفضاء-الزمن يبدو أن لا مردَّ لها، بحيث حتى النور لم يكن يستطيع الانفلات منها. إن فهم هذا الحل الذي يملك توازياً تاماً ذا طابع كروي، وهو توازٍ يعتبَر أحد أبسط الحلول في النسبية العامة، اقتضى أكثر من خمسين سنة. لكن قبل فهم هندسة الثقب الأسود لشفارتزشيلد، كان الرياضيون قد انطلقوا في البحث عن حلول تمكن من وصْف الحالة الأكثر واقعية لجسم دوّار، كما هو حال أغلب الأشياء الفلكية الفزيائية، أو لجسْم يحمل شحنة كهربائية. وكان من اللازم انتظار سنة 1963، وهنا أيضاً خمسين سنة بعد صياغة النسبية العامة، كي يعثر الرياضي النيويزيلاندي روي كير Roy Kerr على فكرة تحول في المعطيات، أي تغيُّر في الخرائطية يمكّن من المرور من ثقب أسود جامد إلى ثقب أسود دوّار. وقليلاً بعد اكتشاف كير، اكتشف إزرا نيومان Ezra Newman تحولاً ثانياً في المعطيات، شبيهاً بذلك الذي استعمله روي كيرّ، يمكّن من وصف ثقوب سوداء تملك في الآن نفسه شحنةً وحركةَ دورانٍ داخلية.

لكن يعود الفضل للفيزيائي الرياضي الشاب براندون كارتر، الذي كان يُتِمُّ حينها تحرير أطروحته بجامعة كامبردج، في البرهنة على الخصائص الباهرة لهذه الحلول الجديدة لنظرية أينشتاين. فقد درس كارتر خصائص «ثقب أسود إلكترون»، أي ثقب أسود له كتلة وشحنة وحركة دوران داخلي لإلكترون، وهو ما سيمكّن من وصف الحلول التي اكتشفها كيرّ ونيومان.

وكما لاحظ ذلك كارتر، فإن التسمية «ثقب أسود» غير ملائمة. فقد فوجئ كارتر وهو يدرك أن هذا «الثقب الأسود الإلكترون» لم يكن أبداً ثقباً أسود من دون رجعة، كما كان يُتوقَّع ذلك. ففي الواقع، تمنح حركة الدوران لـ«الثقب الأسود الإلكترون» شكل خاتم. بيد أن كارتر اكتشف أننا لو عبرنا الخاتم، من الممكن لنا الرجوع على أعقابنا. من ثم، فإن اسم «ثقب الدودة» الذي ابتكره ويلر بلاغياً لوصف الممرّ الصغير الذي يمكن أن تسلكه دودة بحجم مكروسكوبي، يبدو أكثر ملاءمة من اسم «الثقب الأسود»، وهو الذي سنركز عليه في ما سيلي.

والأكثر إبهاراً كان هو أن ملاحظاً ما، إذا كان صغيراً جداً حتى يمر من خلال الخاتم، فسيكتشف فضاء ثانياً ذا خصائص مدهشة. والمفاجأة الأولى التي سيلاقيها

الملاحِظ آتية من أنه إن كان في الفضاء الأول أمام «ثقب دودة إلكترون»، ففي الفضاء الثاني سيرى بوزيترونا، بشحنة مناقضة تماماً. إضافة إلى ذلك، إذا كان «ثقب الدودة الإلكترون» يشد الملاحظ بجاذبية، فسيحس الآن بجاذبية نابذة في الجانب الآخر من الخاتم (الشكل 15).



الشكل 15 : هندسة كيرّ

هذا التشخيص (المبسَّط جداً) لثقب دودة في دوَران، يمكّن من رؤية طرفيْ الفضاء، أحدهما ممثل في أعلى الشكل حيث الجاذبية جاذِبة، والثاني ممثل في أسفل الشكل حيث الجاذبية نابِذة. والفضاءان مترابطان بما يشبه نفقا، يسمى «ثقب الدودة».

وهو أمر يقابل في الواقع أن المرور من جانب إلى آخر من الخاتم يغير أيضاً علامة الشحنة. وأخيراً فإن كارتر قد سجل ما يبدو الخاصية الأكثر إدهاشاً لـ « ثقوب الدودة» هذه، أي أنه باستكشاف الفضاء الثاني حيث الكتلة سالبة وغير جاذبة، من الممكن الرجوع إلى الوراء في الزمن إلى أبعد ما نرغب فيه، والوصول إلى أي نقطة من الفضاء-الزمن.

حين كتب كارتر مقاله الأساسي الثاني، لم يأخذ مأخذ الجدّ اللازم إمكان أن يكون الفضاء الثاني النابذ، والذي يمكّن من صعود الزمن، قادراً على تمثيل جزيْء موجود واقعياً في الطبيعة. وهكذا فكارتر أطلق صفة «مفْرغ كلية» على الفضاء-الزمن لـ«ثقب الدودة الإلكترون» الذي كان بصدد استكشافه. لكن يبدو من الصعب على فيزيائيٍّ للجزْيئات تفادي التشابه الباهر بين الخصائص التي تربط بين جانبي «ثقب الدودة الإلكترون» وتلك التي تربط بين الإلكترون والبوزيترون في معادلة ديراك. هذا التشابه كان قد لاحظه كارتر نفسه كما العديد من الفيزيائيين، كريمو روفيني Remo Ruffini ومات فيسر Matt Visser أو جون ويلر. ففي الحاليْن معاً،يتمّ قلب الشحنة والكتلة والزمن حين نمر من نصف لآخر من الحل. لكن، في نهاية

الستينيات، كانت العديد من المفارقات لا تزال لصيقة بالسفر في الزمن كي يتم بجدية الأخذ بهذه الحلول، التي يبدو فيها الترابط الوثيق بين الإلكترون والبوزيترون والمادة والمادة المضادة.

إن موقف الفيزيائي إزاء هذه المناطق من الجاذبية النّابذة سكيزوفرينيٌّ بعض الشيء، فهو من جهة يرى أنها توجد فعلاً، ومن جهة أخرى يتصرَّف كما لو أنها غير موجودة، لأنها تخلق مشكلات تتعلق بعدم استقرار الحلول (الكتل السالبة)، كما أن تلك الحلول تسمح بالسفر في الزمن على ما يبدو، وهو أحد الجوانب الأكثر إزعاجاً للبلورات الحديثة للجاذبية. من الواضح أنه لا مجال لأن تمكّن الجاذبية، مثلها مثل كل التفاعلات، أي مفارقة زمنية تسمح بصعود الزمن قصد تغيير ماضيه. فالطبيعة ليست مفارقة، فهي موجودة، وهي تحطم بمنهجية كل «آلة لصعود الزمن» ذات طابع ماكروسكوبي. بالمقابل، ليس من المستبعد على الصعيد المكروسكوبي، أن تكون وفرة ثقوب الدودة من حجم صغير مكوّناً أساسياً من العالم الكْوانتي.

وهكذا، ولو أن الطبيعة وبطريقة نهائية تحذف كل إمكانية لـ«آلات للسفر في الزمن»، فإن دراستها في إطار

الجاذبية، تمكّن من استكشاف أفضل للثنايا المخبوءة للنظرية والتكهّن بامتداداتها.

هل السَّفر في الزّمن أمرٌ مُفارِق؟

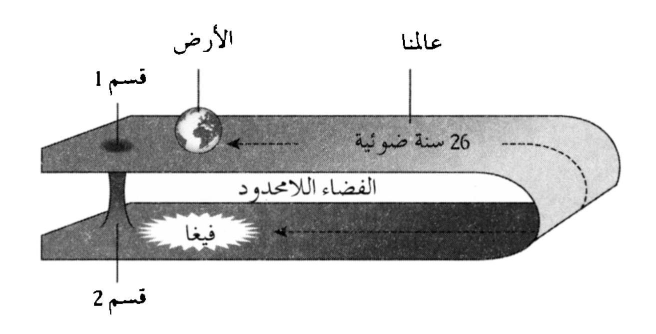
ثمة دراستان، الأولى بعد عشرين سنة من دراسة كارتر والثانية بعد ثلاثين سنة، سوف تمكّنان من العودة لتحديد المادة المضادة التي اقترحتها نظرية أينشتاين في الجاذبية. تعود أولى هاتين الدراستين للفيزيائي الأمريكي كيب ثورن Kip Thorne ولمساعديه. وسوف يسكتشف كيب ثورن من جديد ببساطة الخطوط الكبرى لدراسة كارتر، بيد أن الطابع المبتكَر لهذه الدراسة الجديدة يتعلق بالبرْهنة المقنعة على أن السفر في الزمن، الذي يحيل أكثر على الخيال العلمي أكثر منه على العلم «الصلب»، لا يقود إلى أي مُفارقات زمنية يتهافت على وصفها مؤلفو الخيال العلمي.

وكان كارل ساغان Carl Sagan، العالم والمبسِّط للعلوم المشهور في الولايات المتحدة، الذي توفي سنة 1996، هو الذي أطلق تحدياً للنسبيّين في نهاية الثمانينيات، ببناء حضارة أكثر تقدماً من حضارتنا، لنموذج يسمح بالسفر فوْرياً من نقطة لأخرى. ولهذا الغرض اقترح ساغان بناء «ثقب دودة» بحجم ماكروسكوبي، أي نوعٍ من النفق

في الفضاء-الزمن، يكون عبارة عن طريق سرّي قصير جداً يربط بين نقطتيْن متباعدتيْن جداً في الفضاء العادي (الشكل 16).

اقترح ساغان أولاً الحل المتمثل في أن يرمي المرء نفسه بجسارة في ثقب أسود طامعاً في الخروج من الجهة الأخرى بما يسمى «حنفيّة بيضاء»، وهو الشريط المقلوب للثقب الأسود. لكن كيب ثورن، وهو صديق لساغان وطالب لجون ويلر مثله مثل بيكينشتاين، لم يلبث أن ذكّره أن العلماء كانوا يعرفون أن هذا النوع من الحلول، غير القارّ أبداً، لا يجيب على مشكلته، لأن الممر الذي يمكن أن يوجد بين الثقب الأسود والحنفية البيضاء ينغلق بالضرورة قبل أن يستطيع أي فوتون أن يعْبره. لكن ثورن، استرجاعاً لحلول كير ونيومان، لم يلبث أن اقترح حلاً يمكّن من تحقيق «ثقب دودة». المشكل هو أن هذا الحل كان يبيح استعمال الآلات الزمنية!

قد يبدو الرابط دقيقاً جداً بين هذه الآلات الزمنية والمادة المضادة. لكن، حين نتملّى جيداً في الأمر فإن جزءاً من حل لغْز المادة المضادة قد يوجد في هذا الجانب. وفعلاً، فإن كيب ثورن سيبرهن بسرعة، لإنجاز آلته الزمنية، أنه مضطر لاستدعاء مادة غرائبية تسمح بتحقيق جاذبية



الشكل 16: «ثقب الدودة» لكيب ثورن

إن «ثقب دودة» يربط بين الأرض ونجم فيغا سيؤدي إلى الهندسة التالية للفضاء: ثمة طريقان يمكّنان من القيام بالرحلة إلى فيغا: من جهة، من خلال القيام بسفر من 26 سنة ضوئية عبر الفضاء العادي، ومن جهة ثانية من خلال المرور فورياً تقريباً عبر الطريق القصير لـ«ثقب الدودة». المصدر: مأخوذ عن كيب ثورن، الثقوب السوداء ولّي عنق الزمن، منشورات فلاماريون، 2001.

نابذة. والسبب في ذلك بسيط، فلكي لا يتعرَّض باني نفق «ثقب الدودة» للسحق بين جدرانه الداخلية، عليه بالضرورة استعمال شكل من المادة يجعل الجدْران ثابتة، فيما تدفع بالمستكشِف كي يستطيع الخروج من «ثقب الدودة» نحو الفضاء العادي. بعبارة أخرى، من اللازم إيجاد المادة التي تولِّد جاذبية نابذة، بدل الجاذبية الجاذبة التي نعرف. وهو الأمر الذي يؤدي إلى أن هذا الشكل الغريب من المادة عليه أن يحتوي، على الأقل في مواطن

منه، كثافة من الطاقة سالبة، من حيث هي خاصية يكرهها الفيزيائيون بالنظر إلى عدم الاستقرار الذي تفترض. وهو ما يذكّر بحلول الطاقة السالبة لديراك التي أدخلت مفهوم المادة المضادة، ومعها حلول المادة التي تصعد الزمن.

لكن، حتى إن قبلنا، ضداً على الحدس، بأن السفر في الزمن يؤدي إلى مفارقات، ثمة خاصيّة لم يرصدْها أحد في الطبيعة، أعني النبْذ الجاذبي الذي تنبأت به دراسة كارتر إذا ما نحن مررنا من طرف الثقب إلى طرفه الآخر.

تسْريع توسّع العالم

ألم يرصدْ ذلك فعلاً أحد؟ في 1998، سوف يكون الإعلان المدوّي الذي قامت به فرقتان من علماء أغلبهم أمريكان، «مشروع السوبرنوفا الكسمولوجي»، الذي يشرف عليه صول بولموتر Saul Perlmutter، و«البحث في السوبرنوفا العليا» الذي يشرف عليه براين ب. شميدت Brian P. Schmidt، أشبه بالصدمة على عالم الفيزياء. فقد أعلنت الفرقتان بشكل متزامن تقريباً عن نتائج دراستهما بخصوص تباطؤ الكون: بعيداً عما كان ينتظره العلماء من توكيد، فإن توسع العالم يتسارع بدل أن يتباطأ، على الأقل في المسافات الكبرى التي يصلها الرَّصْد.

ولفهم الحيطة الأولى التي صاحبت الاهتمام الكبير المرتبط بتلك الملاحظات، يلزم أن ندرك صعوبة تلك القياسات الكسمولوجية. لا مجال فعلاً لقياس تغيرات توسع العالم بإنجاز ملاحظات في مسافات أقل من العديد من الملايين من السنوات الضوئية: فآثار التسريع أو التباطؤ لتوسع العالم، إذا ما نحن حصرنا نفسنا في مسافات قصيرة، تكون ضعيفة حتى يمكن التعرف عليها بوضوح. لكن، إذا نحن حصرْنا رصدنا في مسافات من العديد من المليارات من السنوات الضوئية، فإن المشكل الذي يُطرح هو تحديد سلّم المسافات. فمن سنة لأخرى، ركز الفيزيائيون اهتمامهم مع ذلك على مجموعة واعدة من «المصابيح العادية»، أي أشياء يكون نورها معروفاً كفاية لوضع رابط مأمون بين الضوء المرصود ومسافة الراصد. هذه الأشياء هي سيبرنوفات، أي نجوم تحررُ نهايتُها الكارثية كميّات خيالية من الطاقة في بعض اللحظات، والتي يتجاوز لمعانها خلال انفجارها لمعانَ المجرة التي تحتويها كاملة.

وفي الوقع فإن كل السيبرنوفات لا تملك لمعاناً قابلاً لإعادة الإنتاج كي يمكن أن يجعل منها «مصباحاً عادياً». وحدها السيبرنوفات الآتية من نظام مزدوج يسمى تقنياً

«SN1a» لها نمط من انطلاق الانفجار النهائي يجعلها تعيد إنتاج اللمعان كي تكون مصباحاً عادياً. ففي هذه الأنظمة، تمتص السيبرنوفا المستقبلة شيئاً فشيئاً رياح المادة التي يطلقها النجم المصاحب، لها ويتم اقتيادها نحو انهيار كارثي. يمكننا القول بدقة إن الطاقة التي تبثها سيبرنوفا SN1a ليست دائماً متطابقة، وترتهن بتاريخ (ما يسميه الفيزيائيون الخاصية المعدنية) النجم. والأساسي هو أننا برصدنا لانفجار سيبرنوفا SN1، من الممكن أن نستنبط بدقة (بضعاً من مائة) الطاقة المبثوثة والمسافة عن الملاحظ، من خلال قياس الانزياح عن أحمر الضوء الذي تبثه السيبرنوفا[14].

لقد أعلنت المجموعتان، في ملاحظاتهما عن بضع عشرات من السيبرنوفات، أنهما تتخليان في مرحلة أولى عن أن توسُّع الكون يتباطأ، كما توحي به الجاذبية الجاذبة التي نعرفها. يتطلب توكيد تسريع توسّع الكون رصْد مجموعة أكبر من السيبرنوفات. والطابع الأساس لهذه الملاحظات يسمح للباحثين بأن يحصلوا على وقت كبير للملاحظة والرصد في القمر الصناعي هابل، الذي تتنافس عليه بضراوة الفرق البحثية كلها. في سنة 2005، سوف تؤكد هذه السلسلة من الملاحظات وبشكل تام

الملاحظات الأولية، بجعلها أكثر دقة، في الوقت الذي تمكّن فيه قياسات صدى الراديو الكوسمولوجي الخلفي بـ2,7 كيلفينات، وهي أطلال الانفجار العظيم، كما رصد البنيات الكبرى للكون أيضاً من التدقيق أكثر في تشكيلة الكون بمكوِّنين، الأول جاذب منسوب للمادة الموجودة في الكون، والآخر مجهول بشكل كبير ونابذ.

وفي النهاية يبدو أن أكثر من 70 بالمائة من كثافة العالم مرتبطة بالجاذبية النابذة، التي نجهل مصدرها، في الوقت الذي يبدو فيه الثلث من كثافة العالم رهيناً بمادة هي أيضاً غير معروفة كليةً. وكمية المادة العادية، المحدَّدة بدقة بفضل قياس تكوين الكون (خاصة مقدار الهيليوم) لا يمثل إلا أكثر قليلاً من 4 بالمائة من المجموع.

هكذا، إذا كان وجود الجاذبية الدافعة يبدو اليوم أمراً مؤكّداً جداً، لا زال الفيزيائيون يجهدون في العثور على تفسير طبيعي لهذا الشكل الباهر من الطاقة. ولفهم المصاعب التي يعاني منها الفيزيائيون في تبرير هذه الجاذبية النابذة يلزمنا الرجوع للوقت الذي كان فيه أينشتاين، ولأسباب ذات بعد فلسفي واضح، قد أدخل في نظريته «ثابتاً كوسمولوجيا»، وهي طاقة للفراغ نابذة لفترة، نظراً للاستقرار الذي كان يبدو أنها تمنحه للكون. كان ذلك في

الظاهر فقط، إذ سيتوضح بعد ذلك أن الاستقرار الذي يتم التوصّل له بهذه الطريقة كان وهمياً، ولو في الكون المنسجم تماماً، إذ سوف يتعرض ذلك الاستقرار للدمار عند أول خلخلة تؤدي بالمادة إلى التجمع في مجرات. وما إن حُرم أينشتاين من تبريره للاستقرار حتى قرر أن «الثابت الكسمولوجي» الذي أباحته النظرية كان «أكبر أخطائه».

لم يكن للكون الذي تخيله أينشتاين أن يكون أبديّاً، نظراً لأن نجماً ما يحترق وله مدة محددة، حتى لو كانت تلك المدة تقاس بمليارات السنين. ونحن نعرف اليوم أن الكون كان في الماضي أكثر كثافة عما هو عليه اليوم، حيث يملك معدل كثافة يعادل حوالي بروتون واحد في المتر مكعب. تمكِّننا ملاحظاتنا عبر البالون والأقمار الصناعية من رؤية الكون كما كان بعد ما ناهز 14 مليار سنة، في الوقت الذي كفّ فيه عن أن يكون بْلازما شبيهة جداً بالطبقات الخارجية لشمسنا.

لقد رأينا أن الكون، في عمر 380 ألف سنة، وفي حرارة تناهز 3 آلاف درجة، كان قد غدا شفافاً. وتمكِّنُنا ملاحظاتنا من تأمل اللحظات الأخيرة لـ«النجم الكوْن». ففي هذا العصر، كان حجم الكون حوالي ألف مرة

أضعف ممّا هو عليه اليوم في كل واحد من الأبعاد الثلاثة للفضاء، وكثافة الكون حوالي مليار مرة أكبر. إن «الثابت الكسمولوجي» الذي أدخله أينشتاين، وتبعاً لثباته، كان يلعب دوراً هامشياً في المعزوفة الكوْنية، بنسبة واحد من مليار فقط. فقد كان دوره نافلاً أكثر حين نصعد للحظات الأولى من الكون، حيث صارت الكثافة من الكبر بحيث إن الزمن والفضاء يكادان يفقدان معناهما في هذه الفترة من الجاذبية الكوانتية. ففي هذه «اللحظة» كان الثابت الكسمولوجي لا يزن أكثر من جزء صغير جداً من كثافة المادة والإشعاع، أي حوالي 10^{-120}، وهو رقم من الضعف بحيث يبدو غير قابل للتبرير، فكان ذلك هو السبب الذي جعل أينشتاين يتخلى عنه، حين واجه فشل استقرار «الثابت الكسمولوجي» الذي كان من المنتظر أن يمنحه.

لقد كان للعودة التي فرضتها تجربة الجاذبية الدافعة أنها منحت طراوة جديدة للثابت الكسمولوجي، لكن من غير أن يحل ذلك اللغز الذي تطرحه عدم احتمالية قيمته التجريبية. في هذا السياق، يبدو من المجْدي اعتبار الجاذبية الدافعة التي تجسدها طبيعياً نظرية أينشتاين في العديد من الحلول وخاصة منها في ثقوب الدودة التي تشبه كثيراً جزيْئات أولية. قد يتم بذلك استعادة كون يتسم بالتوازي

بين المادة والمادة المضادة، حيث كتلة الجاذبية الدافعة للمادة المضادة ستكون سالبة وستقود طبيعياً إلى مقادير الجاذبية الدافعة والجاذبية المرصودة اليوم. بعبارة أخرى، فإن الكون، منظوراً إليه في مسافة كبرى، في ما وراء ركام المادة والغيم الضبابي للمادة المضادة النابذة، قد يبدو «فارغاً» بشكل ما، أي مكوناً من القدر نفسه من المادة ذات الكتلة الإيجابية كما من المادة ذات الكتلة السلبية. من السابق لأوانه أن نحدِّد إذا ما كان هذا التفسير الذي يستعمل كُتلاً سلبية هو الصحيح، غير أن رصد الدفع الملاحظ في المسافات الكسمولوجية يشكل محفزاً كبيراً في هذا السياق.

حوارات في أزمنة مُتناقِضة

إن أحد الجوانب الأهم في تحديد المادة المضادة الذي تقترحه نظرية الجاذبية لدى أينشتاين يكمن في المعنى الذي تمنحه هذه النظرية لمفهوم «المادة التي تصْعد الزمن». ففي الواقع لا تسمح النسبية الضيقة، التي تعتبر الزمن-الفضاء مسطحاً، بفهم كيف أن زمنيْن بوجْهتيْن متعاكستيْن يمكن أن يتعايشا معا في المكان نفسه. لكننا رأينا أن الجاذبية، التي هي ليست تحولاً للزمن-الفضاء، تسمح على الأقل مبدئياً بالحوار بين جهتيْن حيث الرسالة منحرفة إلى درجة تكون

معها مقلوبة في الزمن.

ثمة وضعية يتحقَّق فيها فعلياً هذا الحوار ذو الزمن المقلوب، بالرغم من أن التحقُّق التجريبي صار شبه مستحيل بفعل الشروط المهيمِنة فيه، قرب ثقب أسود دوّار. ونحن ندين للفيزيائي الرياضي روجر بينْروز Roger Penrose من جامعة أكسفورد، بدراسة هذه الآلية التي تسمح باستخراج الطاقة من ثقب أسود، وهو ما كان يُعتقَد أمراً مستحيلاً إلى ذلك الوقت. فقد برهن بينروز على أن الثقوب السوداء الدوّارة تحتوي على منطقة سماها «الدائرة الشغّالة» (الإيرْغو سفير)، تكون فيها حركة جرّ الزمن–الفضاء من الصرامة بحيث إن الملاحظ لا يمكن أن يقاوم دوران الثقب الأسود، وبحيث إنه ينجرف معه. وهكذا اكتشف بينروز أن بإمكان رجل فضاء مغامر، بالتضحية بشيء يرمي به بمهارة باتجاه الثقب الأسود الدوّار، أن يستقي منه الطاقة.

وحين نرجع إلى الفضاءين المرتبطيْن بثقوب الدودة التي وصفها براندون كارتر، ندرك هنا أيضاً أن على الملاحظيْن اللذيْن يسعيان إلى إقامة حوار بين هذين الفضاءين أن يواجها حواراً بزمنيْن متعارضيْن. فإذا كان أحد الملاحظيْن ينشد النشيد الوطني الفرنسي مثلاً، فيبدو أن الملاحظ

الآخر الموجود في الطرف الآخر من ثقب الدود سيسمع حينها النشيد الوطني الفرنسي مُنشَداً بالمعكوس.

لقد سعى الفيزيائي الأمريكي لاري شولمان Larry Schulman، من جامعة كلاركسون، إلى دراسة الآثار والنتائج التي سيفرزها هذا التفاعل بين كوننا وكون آخر شبيه به إذا ما استثنينا كون زمنه يسري في الاتجاه المعاكس.

ولكي ندرك أي مشكل يطرحه هذا الحوار في الزمن المقلوب لنتصورْ الوضعية التالية: إن تبادل رسالة مع ساكن من العالم الآخر في زمن مقلوب يجعلك تدرك أنه قد يكون ثمة ربح متبادل يُستقى من الوضعية هذه. هكذا تتفق معه على آلية متبادلة بموجبها يضع كل واحد منكما كاميرا لديه، بحيث تقوم ببعث الصور إلى شريكك، وهكذا يمكن لكل واحد منكما أن يتدخل للوقاية من الكوارث لدى الطرف الآخر. وحين يلاحظ أحدكما حدثاً مؤسفاً لدى الآخر، كسرقة بيت أو بداية حريق، تنتظر بضع ساعات كي تعود إلى ما قبل الكارثة، ولا تنس أنك تراقب مسار الأمور بعكس الزمن الذي يجري لديه. فبعض الانتظار لن يضيره في شيء، بل بالعكس سيمنحه وقتا أكبر للوقاية من الكارثة.

لكن يبدو أننا نوجد أمام مفارقة، إذ كيف يمكننا

الوقاية من وضعية رأيناها تحدث؟ والأخطر من ذلك، ألن تضع هذه الملاحظات في خطر وجهة الزمن لدى الواحد والآخر من الملاحِظيْن؟ وفعلاً فإن شريط حريق معروض بالمقلوب مثلاً، يقابل وضعية غير ممكنة في عالمنا بتاتاً، حيث الأشياء التي يدمّرها الحريق تعيد تكوّنها وتنبعث كلية من رمادها. فالشريط المعروض بالمقلوب لكأس يتهشّم أو لصحيفة تحترق وتغدو رماداً، يتطلب دقة فائقة كي تستعيد الأجزاء تجمُّعها. ألن يتم تدمير هذه المعجزة فقط برصد العالم بالمقلوب وملامسة نظرنا لذلك؟

إن وضعيات من قبيل هذه التي وصفنا، من التعقُّد بحيث يصعب أن ندرسها بواسطة معادلات صحيحة. لهذا فإن لاري شولمان سعى إلى أن يبسِّط كثيراً هذه الوضعية وذلك بدراسة نظامين مثالييْن من الجزيْئات المنتظمة يتزاوجان بشكل ما الواحد مع الآخر بأزمنة متعارضة. ودراسة لاري شولمان، المنشورة في العدد الأخير من الألفية الأخيرة للمجلة الجادة والفاخرة «Physical Review Letters» من التبسيطية البالغة كي تبلغ شأْو البرهان. لكن هذه البرهنة بالرغم من طابعها الجزئي أساسية من حيث إنها تشير إلى أن سهميْ زمن هذا النظام وذاك يبدو أنهما لا يزالان موجوديْن، إلا إذا كانت

التفاعلات بين العالمين المسهَّمين المتعارضين بالغة القوة، وفي هذه الحالة، يبدو سهما الزمن وكأنهما يغيبان في تماس أحدهما بالآخر.

وإذاً، ما الذي يمنعنا من التدخل في زمن العالم المقلوب؟ فإذا كنا قادرين على الوقاية من الأحداث التي شهدنا وقوعها، ثمة إذاً مفارقة، أليس كذلك؟

لا. ليس ثمة من مفارقة، لأننا في وصفنا نسينا مسألة أساسية: إذا نحن رصدنا الكون الآخر بزمن مقلوب فكل شيء فيه يكون مقلوباً، ومن ضمن ذلك تبادل الطاقة بيننا وبين الأشياء التي نشاهد، وهي المبادلات التي تمكّن من الملاحظة. لنأخذ مثال النيزك الذي يتجه بسرعة نحو الأرض. ففي العالم الذي تقع فيه هذه الكارثة، في هذه الصبيحة، ينير ضوء الشمس مسرح الحدث ويمكّن الكاميرات من تصوير التصادم. وهذا التصادم يفرز طاقة هائلة تبعث بالفوتونات، أي جزيئات الضوء، من مكان الاصطدام إلى عينك. لنقلبْ الآن اتجاه الزمن: لم يعد المشهد قابلاً للرؤية ومن المستحيل علينا أن نخطر أبناء العالم الآخر. وفعلاً لا يكفي عرض الفيلم بالمقلوب، بآلة عرض يكون الضوْء المنبعث منها يسير من المشهد نحو عينك. ينبغي أيضاً قلب دَفَق الطاقة: فبعد قلب الزمن

هذا، تصبح عينك هي الآن التي تصدر الفوتونات. وذرات الضوء هذه سوف تتسارع نحو الشمس، والنيزك سيبدو وهو يجمع أشلاءه ليستعيد كتلته. ثمة مثال ثانٍ يتعلق بالفيلم (الصائت)! المعروض بالمقلوب صوتياً: في هذه الحالة فإن الذبذبات الصوتية تبثها الحيطان وتجهيزات القاعة وآذان المشاهدين، وتتوجه نحو أدوات الموسيقى...

إن دراسة لاري شولمان تؤكد بأن المزاوجة بين منطقتيْن لا تؤدي بالضرورة لتحطيم سهم الزمن لهذا الكون أو ذاك. فدراسات شولمان، مثلها مثل دراسة ثورن ومساعديه، تبرهن على أن بنية الكون المزْدوج ذي الأزمنة المتعارضة، الذي اقترحته «ثقوب الدودة» باعتبارها جزيئات النسبية العامة، لا تؤدي إلى مفارقات غير قابلة للتفادي.

وزن المادّة المضادّة

ثمة مسألة تتعلق بمعرفة إذا ما كان للمادة المضادة الوزن نفسه الذي للمادة. وبالأخص، هل يمكن للمادة المضادة «أن تسير عكس الجاذبية»، أي أن تمارس قوة نابذة لا جاذبة على أجسام المادة؟ وبالأدق، هل يمكن أن تتنبأ نظرية أينشتاين عن الجاذبية والنسبية العامة بهذا النوع من الجاذبية النابذة للمادة المضادة؟ يعتبر أغلب الفيزيائيين أن

الجواب على هذا السؤال بدهي: يبدو مبدأ التعادل (إذ بالنسبة للشروط الأولية المتطابقة، تتبع الأجسام كلها في المسير نفسه) في هذه النقطة مركزياً في النظرية النسبية العامة، بحيث لا نفهم كيف يمكن لنظرية الجاذبية هذه أن تميز بين وزن المادة ووزن المادة المضادة[15].

لنتذكَّرْ فعلاً أن النسبية العامة تصف الطريقة التي بها يتم مُنْحنى الزمن-الفضاء بفعل المادة. وما إن يتم تعيين الطريقة التي بها يتبلور منحنى الزمن-الفضاء، يغدو المبدأ في غاية البساطة: فالطريق الذي تختاره المادة هو الذي يمكِّن من اختصار الطريق (والواقع أن الأمر يتعلق بالطريق الأطول باعتبار أننا ننظر للمسافة في الفضاء-الزمن لا في الفضاء ذي الأبعاد الثلاثة). وبما أن منحنى الفضاء هو نفسه بالنسبة لجميع الأجسام، مهما كان تكوينها، فهي ملزمة باتباع المصير نفسه إذا ما تم إطلاقها في الشروط نفسها. ومع ذلك، كما سنرى، ثمة مفاجأة كبرى يلزم ارتقابها. بدأ اهتمامي بهذه المسألة الغريبة حين كنت أسعى للبرهنة على أن من المستحيل أن يكون للمادة والمادة المضادة وزن مختلف (باعتبار أن الوزن ليس سوى قوة الجاذبية الجاذبة)، فكانت البرهنة كالتالي: لنفترض أن ثمة فارقاً كبيراً في الوزن بين المادة والمادة المضادة. حين

يصبح الفرق كبيراً جداً ننتهي إلى «كسر» الفراغ، أي أنه سيبدأ في إنتاج جزيْئات في وجود حقل جاذبية.

علينا أن نتذكر أن الـ«فراغ» الكوانْتي لا يحمل من الفراغ إلا الاسم وأنه بشكل ما يحتوي على أزواج تسمى افتراضية، تتكون من جزيْء وجزيْء مضاد، مثلاً: إلكترون-بوزيترون. ونحن نلاحظ هذا الأثر لانقطاع الفراغ في حالة الشحْنة الكهربائية، فإذا نحن صنعنا أنْوية تملك أكثر من 140 بروتوناً (وأنْوية كهذه ليست مستقرّة، لكن من الممكن صنعها للحظة قصيرة في التصادم بين نواتين أخف)، فإن الحقل الكهربائي للنواة يجذب لهذه النقطة الإلكترونات بحيث يغدو من المفيد للفراغ خلق زوْج من الإلكترون والبوزيترون. سيخفض الإلكترون من شحنة النواة بالهجوم على هذه الأخيرة، في الوقت الذي يتم فيه الإبعاد العنيف للبوزيترون. طبعاً ليس من المسموح به افتراض وجود فارق في السلوك العنيف بين المادة والمادة المضادة في حقل الجاذبية الأرضي. لكن ما إن يكون للمادة والمادة المضادة وزن مختلف، حتى يكون علينا أن نتوقّع أن يبدأ الفراغ في الإشعاع وأن يغدو من ثم غير مستقر.

يعتبر أغلب الفيزيائيين اليوم، كما في وقت ديراك، أن عدم استقرار الفراغ أمر غير مقبول. لكن، ربما كان هذا

التبخر للفراغ في جوار جسم كتلة ضعيفاً بحيث لا يمكن ملاحظته. وفعلاً، إذا نحن افترضنا أن كتلة الأرض تتركَّز في مركزها في ثقب أسود، فسيكون لدينا في هذه الحالة تبخر للثقب الأسود وعدم استقرار للفراغ، لكن بإشعاع ضعيف جداً، يكون أضعف بمليارات المرات من الحرارة التي يبثّها الجسم البشري، بحيث يكون من المستحيل البتة قياسه على سطح الأرض. لنعتبرْ إذاً أن الحدّ المقبول للفراغ هو الذي سنلاحظه إذا ما كانت الكتلة متركزة في ثقب أسود، وهو ما يسمى أثر هاوكينغ. أي فرق في الوزن بين المادة والمادة المضادة يلزمنا لِننْتج التبخُّر نفسه للفراغ؟ الجواب من الغرابة بمكان: ينبغي أن تغدو المادة مضادة للجاذبية، أي أن على كتلة الأرض أن تغير من علامتها وأن تدفعها بدل جذبها كما تفعل المادة مع كتلتها الإيجابية.

الجاذِبية المضادة واللاتوازي بين المادّة والمادة المضادّة

في الواقع ثمة نظام آخر حيث يمكنَ لفرق بسيط في الوزن بين المادة والمادة المضادة أن يؤدي إلى نتائج قابلة للملاحظة: يتعلق الأمر بالكاوونات المحايدة التي لاقينا، والتي تعتبر الزوج الوحيد «جزيْء-جزيْء مضاد» التي

يمكن أن نرصد فيه التوازي CP، أي اختلافا في السلوك بين المادة والمادة المضادة. لنفترضْ أنه يتم السؤال عن الفرْق في التشريع بين المادة والمادة المضادة الضروري لتفسير خرق CP في نظام الكاوونات. في سنة 1961، طرح الفيزيائي الأمريكي مايرون غود Myron Good سؤالاً مماثلاً. لكن بما أن لا أحد كان يعرف وقتها اللاتوازي بين المادة والمادة المضادة الذي اكتُشف بعد ذلك بثلاث سنوات، ولا تبخر الثقوب السوداء، الذي اكتُشف سنة 1974، فإن مايرون غود قام بطرح فرضية تقول إن الفراغ غير مستقر. بالمقابل، إذا علمنا أن هذين الأثريْن موجودان في الطبيعة، يغدو من الطبيعي أن نطرح السؤال بشكل مختلف مطالبين باحترام التوازي CP، الذي خرقه غود في فرضياته. وبهذه الفرضية الأكثر طبيعية، فإن الجواب الأكثر إدهاشاً هو أن الجاذبية المضادة هنا أيضاً بالكاد تكفي لتفسير اللاتوازي بين المادة والمادة المضادة في نظام الكاوونات المحايدة. فهي تدخِل فقط الفارق الصغير بين وظائف ذبْذبات الكاوون والكاوون المضاد الذي يمكّن من التجْسيد التجريبي لخرق CP.

بيد أن هاتين المصادفتين، مهما كانتا رهيبتيْن، لا تكفيان لزعزعة الثقة التى للفيزيائي في النظرية الباهرة التي هي

النسبية العامة لأينشتاين. فالفيزيائي يعلم جيداً أن الجاذبية في النسبية العامة تكون دوماً جاذبة لا نابذة. لكن حذار. كما رأينا ذلك، فإن التوكيد الذي تتضمنه الجملة السابقة خاطئ. وفعلاً، وعلى العكس من ذلك، كثيرة هي الأمثلة (التضخم، الثابت الكوسمولوجي، «ثقوب الدودة») في النسبية العامة حيث الجاذبية تبدو نابذة.

أين نعثر على التحولات C وP وT؟

هكذا، بدراستنا لتلك المناطق التي تكون فيها الجاذبية نابذة، ندرك أن المشكلات التي تبدو باطلة في الوهلة الأولى تثير في الواقع خصائص المادة المضادة كافة. لنستعدِ التحولات C وT، التي ساعدتنا في فهم أن المادة المضادة يمكن أن تدرَك باعتبارها المادة التي تصعد الزمن. لنتأمل أولاً التحول T. يمكنُنا أن نبرهن على أن من اللازم ولوج منطقة الجاذبية الدافعة للرجوع القهقرى في الزمن. وحين نبعث بجزيْء إلى هذه المنطقة، تبدو لنا إذاً كما لو كانت جزيئاً مضاداً، أي جزيئاً يصعد الزمن (وذلك هو التحول T).

لنتفحَّص الآن التحول C. فالمغامر الذي يعبر خاتم ثقب دودةٍ مشحونٍ يأتي من منطقة تكون فيها الجاذبية

جاذبة وحيث يرى أن الكتلة المركزية تملك شحنة Q. وحين يعبر ثقب الدودة، يرى في الآن نفسه الشحنة تغيّر علامتها والجاذبية تصبح نابذة. مثلاً، إذا رأى في البداية إلكتروناً، فهو يرى الآن بوزيترونا بعد أن مرّ من ثقب الدودة. ومن المثير أن هذه الخصائص، وهي نتيجة مباشرة للنسبية العامة لأينشتاين، بالرغم من أنها معروفة منذ نهاية الستينيات، لم يفكر أحد في أن يربط بين الكتل السالبة والجاذبية النابذة للمادة المضادة.

إن هذا التأويل الجَسور لحلول النسبية العامة يتميز بالاقتصاد. وهو هنا يمنح معنى فيزيائياً لحلول الطاقة السلبية للنسبية العامة نفسها، وهي حلول تم السعي لإخفائها لأن لا أحد عرف كيفية توظيفها منذ اكتشافها. بالإضافة إلى ذلك، يمكِّن هذا التأويل أيضاً من تفسير لغز التوازي الصغير جداً بين المادة والمادة المضادة، الذي تم رصده في الميزونات المحايدة فقط. لكن، وبالرغم من أن هذا التأويل أبعدُ من أن يتمّ قَبوله، من المْمكن تجريبه والتحقق من مدى مطابقته للواقع: وهكذا يمْكن إنجاز تجربة لقياس خرق CP في المركبة الفضائية (حيث حقل الجاذبية أضعف، من غير أن يكون منعدماً)، وهي تجربة اقترحها الفيزيائي الأمريكي ألان ميلز Allen

Mills. وتوضع الكاوونات المحايدة التي ينتجها إبطال البروتونات المضادة المنقولة في زجاجة مشابهة لتلك التي استعملها جيرالد غابرييلز Gerald Gabrielse، كما سنرى ذلك في ما بعد.

وزن الكترون

إن القيام بوزن المادة المضادة ذو أهمية كبرى. لكن بما أن الجاذبية هي القوة الأضعف من بين القوى ينبغي، للتوصل إلى قياس وزن جزيْء، التحكم في المادة المضادة حتى تبلغ مستوى حرارياً قريباً من الصفر المطلق. في المقالين المنشورين سنة 1967 في مجلة «Physical Review Letters» أعلن ويليام فارينباك William Fairbank وطالبه فريد ويتبورن Fred Witteborn، من جامعة ستانفورد، أنهما قد قاسا الكتلة الجاذبية للإلكترون. كان هذا القياس في تلك الفترة يبدو أمراً مستحيلاً بالنظر إلى الضّعف الكبير لقوة الجاذبية على جزيْء خفيف جداً كالإلكترون. لنفكرْ بالفعل في أن قوة الجاذبية على إلكترون تقابل حقلاً كهربائياً أقل من واحد في المليار من الفولت في المتر. بالمقارنة، فإن الحقول الكهرُسكونية في وضعيات الحياة العادية تكون دوماً بنسبة مائة فولت في المتر، بل بنسبة عدة

آلاف من الفولتات في المتر، حين يخرج الواحد من سيارته أو حين يلبس نعالاً عازلةً.

وبما أن ويتبورن وفايربانك كانا واعيَيْن بصعوبة القياس العازمين عليه، فقد استعملا أنبوباً قصد حماية الإلكترونات ضد تأثير الحقول الكهرُمغناطيسية المحيطة وكاتود (مهبط سالب) يبث الإلكترونات في حرارة ضعيفة للحدّ من البلبلة الناجمة عن الحرارة العادية. وفي المبدأ، كما نتعلم ذلك في الجامعة، يكون الحقل منعدماً في داخل حظيرة معدنية مغلقة (صندوق فارادي)، وحتى لو كان من الصعب إنشاء فجوات عازلة تماماً عن الحقول الخارجية، من الممكن التخفيف بشكل كبير من الحقول الكهرُسكونية بهذه الطريقة.

وفي ستانفورد أيضاً في المرحلة نفسها، كان ليونار شيف Léonard Schiff وموريس بارنهيل Maurice Barnhill قد درسا الحقل الكهربائي الذي تؤدي إليه الجاذبية داخل موصِل كهربائي. وفعلاً، فإن الإلكترونات تكون أقل انجذاباً من الأنْوية الذرية في حقل الجاذبية الأرضي، وهذا له نتيجة تتمثل في اختلاف بسيط جداً في الوضعيات الوسطى للأنْوية بالنظر إلى الإلكترونات (فالإلكترونات، وهي أخفّ وزناً، تكون في المعدل في الفوْق أكثر بقليل

حين تتم التجربة في غياب الجاذبية)، وهو ما يثير حقلاً كهربائياً صغيراً جداً، غير أنه يسمح (كما برهن على ذلك شيف وبارنهيل) بالتعويض التام لحقل الجاذبية الذي تمارسه الأرض على الإلكترونات.

في 1967، أي السنة التالية، وبعد العديد من المجهودات، أعلن ويتبورن وفايربانك أن كل شيء يتم فعلاً كما لو أن قوة الجاذبية كانت منْعدمة على الإلكترون. وبالضبط، أعلنا أنهما قاسا قوة أدنى من 10 بالمائة من وزن البروتون، متلائمة مع القوة المحايدة التي أعلنها تلميذه شيف.

لكن العديد من العلماء أعلنوا عدم موافقتهم على نتائج ويتبورن وفايربانك. فبعد وقت قصير من نشر العالميْن لهذه النتيجة، أعلنت مجموعة من الفيزيائيين (ديسلر Dessler وتراميل Trammell ومشيل Michel، وروَرشاش Rorschach) أن الأثر الذي تكهّن به شيف وبرانهيل كان يلزم أن يتعرض للحجْب من قِبَل حقل كهربائي أهم بأكثر من آلاف المرات. إن انسحاق البنية البلّورية للأنبوب المعدني الحامي تحت تأثير الجاذبية يؤدي إلى حقل كهربائي مهم داخل الأنبوب للصّراع ضد هذا الانسحاق.

ومع توالي السنوات، جاءت العديد من البراهين كي

تثير شكوكاً أكبر في النتيجة الأولية لويتبورن وفايربانك. فقد قام تيموثي دارلينغ Timothy Darling أيضاً بدراسة القوى المتنوعة، التي لم تشملها دراسة المؤلفين، كالتصادمات مع الغاز العالق في الأنبوب المعدني، أو كالحقل الكهربائي الناجم عن الميادين البلّورية للأنبوب المعدني، الذي يؤدي إلى جبال حقة بالنظر إلى السنتمترات القليلة للأنبوب. ثم إن هامفري ماريس Humphrey Maris أكد على الضجيج الحراري الذي لا يمكن تفاديه، الناجم عن صلابة الأنبوب المعدني، والذي يخلق هنا حقلاً اعتباطياً يكون أعلى من الحقل الضروري لإبطال حقل الجاذبية على إلكترون.

بعيْد وفاة وليام فايربانك، أصدر فريد ويتْبورن مقالاً يفنّد فيه جزئياً الملاحظة الأصلية، لكن بالتأكيد على أن التفنيد لا يشكك في قلب قياس كتلة الجاذبية للإلكترون. لكن اليوم، ولو أن نتيجة ويتبورن لا تزال مرجعية، فإن أغلب المختصين في الميدان يعتبرون أن نتيجة ويتبورن وفايربانك كانت خاطئة، وأن النتيجة كانت في الواقع تعود إلى آثار غير مرغوب فيها لم تؤخذ بعين الاعتبار في الجهاز التجريبي.

قياس وزن بوزيترون

عكس ما يُكتب أحياناً، فإن القياس على البوزيترون لم يتم إنجازه، لأنه أكثر صعوبة في التحقيق من القياس المُمارَس على الإلكترون، وذلك بفعل صعوبة الإنتاج والحفاظ على إبطال البوزيترونات ذات البرودة، أي التي تكون من البطء بحيث يكون لقياس الجاذبية معنى. وفي سنة 1996، كان الفيزيائي الأمريكي ألان ب. ميلز هو الذي استطاع رفع التحدي الذي أطلقه فايربانك فاقترح قياسا أكثر طموحاً من الذي تصوَّره هذا الأخير. عزم ميلز على بناء أنبوب معدني هائل وأفقي من عشرات الأمتار طولاً، في تجربة قريبة من التجربة التي حاولها فايربانك وويتبورن، لكن آخذاً بعين الاعتبار الانتقادات التي تعرضت لها التجربة السابقة. كانت المزايا الكبرى لميلز، كتجريبي وفيزيائي، مشهورة وتحفز على التعامل بجدية مع مقترح قد يُعتبر مستحيلاً لو كان صدر عن فيزيائي آخر. وهكذا توصل ميلز خلال السنوات السابقة إلى تبريد بوزيترونات إلى بضع درجات كِلفين بإدخالها في فرشات عازلة مبرَّدة بحرارة الهيليوم السائل. هذا الأثر كان باهراً باعتبار أن جزءاً كبيراً من البوزيترونات تستطيع الانفلات من الإبطال، في الوقت الذي يتم الزجّ بها في

المادة التي كان عليها الاندثار فيها.

وفي الوقت الذي كانت فيه إيطاليا، التي ظلت تحاول استقطاب ميلز، تستعد لتمويل تجربته، تم انعقاد مؤتمر عن الجاذبية والمادة المضادة سنة 1996 لمناقشة مقترح تجربة ميلز، وتلك التي كان يُهيَّأ لها منذ سنوات في المركز الأوروبي للبحوث الذرية بجنيف على البروتونات المضادة. وبما أني كنت من بين المشاركين في المؤتمر، أقنعت بصعوبة كبرى ميلز أن الضجيج الكهربائي للأنبوب المعدني (المسمى أثر جونسون والمربوط إلى مقاومة الأنبوب المعدني المستعمل كحماية) سيجعل القياس الذي يقترحه أمراً مستحيلاً. وكانت البراهين التي عارضتُ بها ميلز تقوم أساساً على دراسة قياس الجاذبية على بروتون مضاد (وهو أمر أسهل مبدئياً) باعتبارها تجربة تتم في المركز الأوروبي للبحوث الذرية - PS200 - يشرف عليها فيزيائيون من لوس ألاموس ومن المركز، ويسعون إلى أن يحققوها في جنيف منذ العديد من السنوات. وقد كنت بمعيَّة دانييل إستيف Daniel Estève ومشيل ديفوري، الذي كان قد أنجز تجارب رائدة في الإلكترونيكا الكوانتية (الكوانترونيكا)، وطالبٌ اسمه فانسان بوشيا، قد قمنا بدراسة الطريقة التي بها تقوم إلكترونيكا كوانتية، تستعمل إلكترونات الواحد

بالواحد، تخلق بالضرورة، بالعودة للبروتون المضاد، حقلاً كهربائياً اعتباطياً عملنا ما في وسعنا على اختزاله لجعله شبيهاً بقوة الجاذبية على ذلك الجزيْء، بكتلة تقارب 2000 مرة أكبر من الإلكترون. وانتهت تجربة قياس كتلة الإلكترون من غير أن يكتمل في نهاية حياة الخاتم LEAR (حلبة البروتون المضاد ذي الطاقة الضئيلة) في نهاية 1997.

إن قياس فعل الجاذبية على الجزيئات المضادة المشحونة، كالبوزيترون أو البروتون المضاد، بدت من غير أمل، بحيث إن الفيزيائيين توجهوا نحو إنتاج الهيدروجين المضاد، الذي يمكّن الطابع الكهربائي المحايد له من التحرر من جزء كبير من القوى الكهرُمغناطيسية التي تمنع من قياس الجاذبية على الجزيئات المشحونة.

الباب الخامس

التحكُّم في المادّة المضادّة واسْتعمالِها

صُنع المادة المضادّة

خلال إعلان المركز الأوروبي للأبحاث الذرّية، سنة 1996، عن رصد الذرات الأولى للهيدروجين المضاد، لاحظنا في الصحافة الموجّهة لعموم القراء إعلانات عن المادة المضادة تركت الكثير من العلماء حالمين. ألم يتمَّ الحديث عن الصنع القريب لكميات كبيرة من المادة المضادة، بل حتى عن قنابل من المادة المضادة؟ بيْد أن صنع المادة المضادة بكميات معقولة أمر صعب للغاية ومكلفٌ؛ فبالرغم من موارد المركز الأوروبي للأبحاث الذرية، ومن آلة مراكمة البروتونات المضادة، التي تُعتبر إلى جانب مختبر «فيرمي» بشيكاغو أهم موْرد للبروتونات المضادة في العالم، فإن الكمية الإجمالية للمادة المضادة التي أنتجها ذلك المركز منذ إنشائه لا تتعدى مليغراماً، بل أقلّ إذا نحن لم نقبل إلا بالمادة المضادة التي يتحكم فيها الإنسان وينْتجها ويوجّهها في مسرِّع آلي. لا يتعدى الأمر بالتأكيد ميكروغراما، أي وزن عضو مكروسكوبي. والبلد الذي يقرر رصد موارده لإنتاج قنبلة ولو صغيرة من المادة المضادة، سيجد نفسه على شفا الخراب في هذا المشروع نظراً لأن كلفة إنتاج المادة

المضادة باهظة جداً.

لنأخذْ مثال إنتاج المركز الأوروبي للأبحاث الذرية، الذي يملك برنامجاً عالمياً طموحاً في مجال إنتاج المادة المضادة ذات الطاقة الضئيلة. ولإنتاج المادة المضادة، أي المادة التي تصعد الزمن، يلزم الضرب بقوة هائلة على هدف معيّن بالبروتونات التي تسير بسرعة قريبة من سرعة الضوء. وحتى في هذه الحالة يكون الناتج كارثيّا. ففي المركز الأوروبي للأبحاث الذرية مثلاً، لا يتعدى هذا الناتج حتى بروتوناً مضاداً مقابل 100000 بروتوناً ترمى على الهدف. والسبب في هذه الكارثة نابع من العديد من العوامل: أولها، أن من الصعب جداً أن ننتج في التصادم جزيْئات غير مستقرة وأخفّ من البروتون، كالميزونات p، والطبيعة تتوفّر عليها. ثم إن البروتونات المضادة النادرة المنتَجة من الصعب جمعها بفعالية كبرى باعتبار أننا لا نتحكّم في وجهة بثّها، وهو أمر لا مفرّ منه بالنظر إلى نمط الإنتاج العنيف جداً. وأخيراً، ما إن يتمَّ إنتاج البروتونات المضادة، يلزم تبريدها لأن بلْبلتها الأصلية لا تسمح بالاحتفاظ بها طويلاً في خاتم الخزن، وهذا التبريد يؤدي مرة أخرى إلى خسارات لا يُستهان بها.

إن إنتاج أنْوية مضادة أمر أشدُّ عسرا. فلصنع نواة

مضادة، يلزم أن يكون للبروتون المضاد والنوترون المضاد حظ أن ينتجا وهما تقريباً في وضعية جامدة أحدهما بالعلاقة مع الآخر، وإلا فإن النواة المضادة، وبالنظر إلى طاقتها الضئيلة، لا تتمكّن من التشكُّل ومن اصطياد النوكليونات المضادة. والأمر يتعلق بتجربة فرنسية إيطالية، سارت بعيداً في السبعينيات في المركز الأوروبي للأبحاث الذرية، في إنتاج الأنْوية المضادة. والنواة «الأثقل» التي تمكنت هذه التجربة من إنتاجها هي الهيليوم المضاد، الذي يتضمن بروتونيْن مضاديْن ونوترون مضاد. وكما نرى، لن نسير بعيداً بهذه الطريقة في إنتاج العناصر الكيميائية... وإذا ما كانت هذه التجربة الرائعة تبدو محبِطة شيئاً ما، فهي تسمح مع ذلك بتقدير حصيلة إنتاج كربون مضاد يتضمن ستة بروتونات مضادة وستة نوترونات. وهذه الحصيلة هي بنسبة 10^{-50}، أي أنه سيكون علينا دلْق ما يقارب كتلة الأرض على هدفنا كي نتمكن من إنتاج هذه المادة المكوَّنة من بضعة أنْوِية من الكرْبون المضاد. في ذلك تتمثل الصعوبة الكبرى في إنتاج الأنوية المضادة التي ستجعل الملاحظة مهمة، ولو ملاحظة نواة واحدة من الكربون المضاد في الإشعاع الكوني، لأنه سيعني بالضرورة تقريباً وجود عالمٍ من المادة المضادة.

الهيدروجين المُضادّ

لقد أشرنا إلى أن العالم خطا خطوة كبرى نحو بناء عناصر عالم من المادة المضادة في يناير 1996، بالتركيب بين عشر ذرات من الهيدروجين المضاد. هذه الذرات من المادة المضادة، التي لم تبْق على قيْد الحياة إلا بضع وحدات من مليار من الثانية قبل الاندثار مع المادة الخارجية، تم صنعها في تجربة أشرف عليها الفيزيائي الألماني والتر أولرت Walter Oelert، مستعملاً خاتم LEAR في المركز الأوروبي للأبحاث الذرية. وهذه المرحلة، بالمقارنة مع صنع الأنْوية المضادة التي تحدثنا عنها آنفاً، تمثل قفزة كبرى في التدقيق الضروري بغرض الحفاظ على ذرات المادة المضادة الهشة كما هي، ولو جزءاً من الثانية. والسبب في ذلك يعود إلى أن البوزيترون، في ذرة من الهيروجين المضاد، لا يرتبط بالبوزيترون المضاد إلا بطاقة من حوالي عشرة إلكترون فولت (بالأدق 13,6 eV)، والحال أن في التجربة التي أفضت إلى صنع النوى المضادة الأخف، ترتبط النوكليونات بطاقة بنسبة عشرة MeV أي مليون مرة طاقة الرابط الذري.

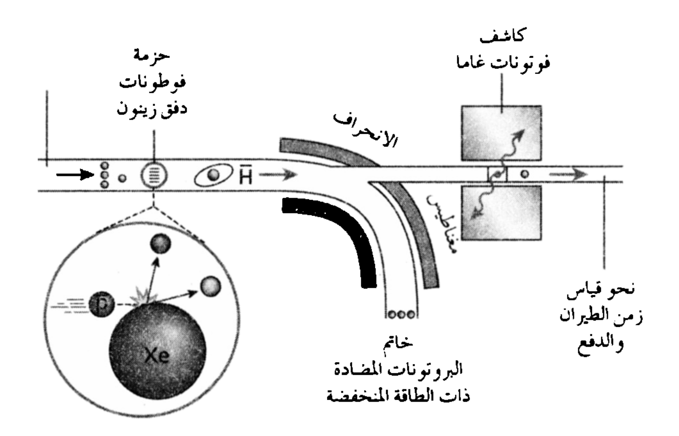
لنعدْ إلى التجربة التي أدت إلى صنع هذه الذرات

المضادة الأولى: فالبروتونات الأولى التي تسري بسرعة كبرى في الخاتم LEAR لها طاقة حركية بنسبة GeV واحد، أي مائة مليون مرة أهم من الطاقة الهشة للربْط بين البروتون المضاد والبوزيترون. إذا نحن سعينا مثلاً إلى صنع ذرات الهيدروجين المضاد بتمريرنا بروتونات مضادة من هذه الطاقة إلى غاز بوزيترونات، فلن تتشكّل أي ذرة. إن الوضعية تشبه وضعية مركبة فضائية تحاول أن تدور حول كوكب وهي تسير بسرعة كبيرة جداً. وكما تبيّن ذلك المقارنة مع محاولة المركبة الفضائية تحقيق الدوران حول الكوكب، ليس من الممكن بلوغ هدفنا، أي الإمساك ببوزيترون حول بروتون مضاد، إلا بالعثور على وسيلة لكبْس سرعته، أي بإفقاده فائض الطاقة الحركية التي تعوق وضعية الدوران.

وبالطريقة نفسها التي نلاحظها مع المركبة الفضائية، من الضروري استعمال مولّدات دقيقة تمكنه من التوقف والدوران، ومن ثم من اللازم في تجربة المركز الأوروبي للأبحاث الذرية إدخال عنصر ثالث يمتص فائض الطاقة. وهكذا تم استعمال حيلة تتمثل في تمرير البروتونات المضادة في نسبة ضئيلة من الهيدروجين الغازي الذي

يحقن به خاتم LEAR. ففي تصادم ذي طاقة قوية مع ذرة من الهيدروجين، يمكن للبروتون المضاد أن يتكئ على الذرة ليبث فوتون غاما سوف يتحوَّل لتوّه إلى زوج من الإلكترون-البوزيترون، وفي حال جزء ضئيل من الحالات، سوف يتجسد البوزيترون مادياً ودوّاراً حول البروتون المضاد. ومن النافل القول بأن الحصيلة أكثر كارثية منها في إنتاج البروتونات المضادة.

ولرصد ذرات الهيدروجين المضاد المنتَجة، ولأن أي اصطدام مهما قلَّ شأنه مع المادة قادر على تحطيمها، سوف يتم استغلال كونها محايدة ومن ثم غير حساسة للحقل المغناطيسي الذي يحافظ على مسير البروتونات المضادة في داخل الخاتم LEAR. بعبارة أخرى، فإن ذرات الهيدروجين المضاد هي الجزيْئات الوحيدة التي ستستمر في مسيرها نظراً لشحنتها المنعدمة. هناك، فإن الذرات التي خُلقت بصعوبة سوف تندثر مباشرة متى ما تلاقت مع نافذة الخروج التي تسمح بالحفاظ على الفراغ في المسرّع الآلي. لكن سيكون الوقت كافياً للتحقق من أن جزيْئتيْن (البوزيترون والبروتون المضاد) سيمران من النافذة قبل أن يتفكّكا في المكشافات الموجودة في المقدمة



الشكل 17: إنتاج الهيدروجين المضاد

إن صناعة الذرات الأولى من الهيروجين المضاد في خاتم LEAR بالمركز الأوروبي للأبحاث النووية، تمت عبر تصادم بروتونات على ذرات من الزينونات التي يحقن بهت المسرّع. وخلال هذه التصادمات، يحدث أن يخلق البروتون المضاد زوْجاً من الإلكترون والبروتون ويجرف معه البوزيترون. هذه الذرة المحايدة من الهيدروجين المضاد لم تعد تخضع لتحريف المغناطيسات من قِبل الحقل المغناطيسي، وحين تتابع طريقها سوف تتعرض للاندثار الذاتي في مكشاف من المكشافات.

المصدر: المركز الأوروبي للأبحاث الذرية.

(الشكل 17). ومهما كانت أهمية الإنتاج بهذه الطريقة للذرات الأولى من المادة المضادة تبدو صعبة الاستعمال باعتبار أنها ما إن يتم إنتاجها، حتى لا تستطيع الذرات وهي أشياء محايدة، أن تنصاع للتّوجيه أو الاصطياد. فما إن تخلق حتى تندثر في الجدران.

مَبطئُ البروتونات المضادة (AD) للمركز الأوروبي للأبحاث الذرية

لدراسة المادة المضادة من الضروري معرفة المحافظة عليها لزمن معيَّن. وهكذا تم إنشاء مشروع أكثر طموحاً لإنتاج الهيدروجين المضاد في المركز الأوروبي للأبحاث الذرية، في الوقت الذي اتخذ فيه هذا الأخير القرار بوقف حلبة البروتون ذي الطاقة الضئيلة (LEARN). يتعلق الأمر بصنع ذرات «باردة» من الهيدروجين المضاد. ولهذا الغرض، كانت التقنية مختلفة عن تلك التي استعملها في 1995 أوليرت ومساعدوه. كان الخاتم LEAR الآلة الوحيدة التي أنشئت لا لتسريع الجزيئات، ولكن لتبطيئها بالحدّ من طاقتها الحركية بمعامل 200. وقد تمَّ توقيف «لير» سنة 1997 لأسباب اقتصادية ليتم تعويضه بآلة أصغر وأكثر اختصاصاً سميت AD (مبطئ البروتونات المضادة). ويمكن للمبطئ، بعد تخزين البروتونات المضادة ذات الطاقة الضئيلة، بسرعة «فقط» من عُشُر سرعة الضوء، من أن يلفظ البروتونات المضادة التي يخزّن ويبطِّئها أكثر عبر كبْسها من خلال ورقة من المادة. وكما يمكن أن نتصور ذلك، وحده جزء صغير من البروتونات يتمكّن من البقاء على قيد الحياة من هذه المعالجة الصادمة.

في ما بعد يتمّ الإمساك بالبروتونات المضادة الحية وحبسها في بئر عميقة من الممكنات الكهربائية، وفي حظيرة من الفراغ تكون أكمل ما يمكن[16]، ففي الضغط العادي تتعرض الذرة إلى حوالي مليار صدمة في الثانية. ولتبريدها، إذ تظل للبروتونات المضادة هنا طاقة كبيرة غير منظمة، يتم في ما بعد حقنها بإلكترونات بحرارة ضئيلة لا تستطيع الاندثار مع البروتونات المضادة، لكن لها الشحنة نفسها ويمكن الحفاظ عليها في الشَّرَك نفسه. وما إن يتمَّ تبريد البروتونات المضادة على هذا النحو إلى بضع وحدات من مليون من سرعة الضوء، حتى تغدو قابلة للاستعمال بحقول كهربائية أكثر ضآلة، وهو الأمر الذي يمكّن من نقلها في ما يشبه «القنينات» حيث تنتظر رغبة الفيزيائيين في التجريب. وهكذا، قام الفيزيائي الأمريكي جيرالد غابريلس بنقل بروتونات مضادة عبر كامل تراب الولايات المتحدة محفوظة في «قنينات» من قبيل تلك.

وحتى في الشروط المواتية التي يمكن فيها خلق تعايش بين البروتونات المضادة والبوزيترونات، فإن تكوين الهيدروجين المضاد يظل تحدياً تجريبياً مهماً.

وبالعودة للتناظر بين المركبة الفضائية العائدة من رحلة بين الكواكب، والتي لا تستقر حول الأرض إذا لم

تجد وسيلة للتخلص من الطاقة، فإن البوزيترون لا يمكن أن يستقر في البروتون المضاد إلا إذا فقد جزءاً من طاقته. يمكننا طبعاً انتظار أن يعود البوزيترون إلى حاله الأساس بشكل طبيعي ببث فوتونات، لكن الزمان الخاص بهذا الهدوء هائل ويبدو غير واقعي لصنع الهيدروجين المضاد بكميات معقولة. وإحدى الطرق التي يتم تجريبها حالياً لهذه التهدئة تتمثل، كما في التصنيع في الهواء للذرات الأولى من الهيدروجين المضاد، في استعمال وسيط بين الخصميْن يتمكن من امْتصاص الصدمة ويسمح بذلك بتكوُّن الذرة المضادة. ويمكن لهذا الغرض استعمال إما بلازما كثيفة، حيث الكثافة من القوة بحيث إن قرب الجزيْء المتفرج يكون أمراً عادياً، أو ذرة غير متوقعة وغير مستقرة تسمى البوزيترونيوم. وهو مكوَّن من إلكترون وبوزيترون يدور أحدهما حول الآخر، ونعرف كيف نصنعه بطريقة دقيقة جداً باستعمال مصادر إشعاعية ذرية.

نجحت فرقة دانماركية في آرهوس Aarhus سنة 1996 في البرهنة على إمكان صنع الهيدروجين بهذه الطريقة في رد الفعل حيث كل جزيْء تمَّ تعويضه بجزيْئه المضاد، وبحيث إن تجربتيْن تسميان «أثينا» و«أتراب» قد استقرتا لدى AD (مبطئ البروتونات المضادة) في المركز الأوروبي

للأبحاث الذرية، قصد تجريب وإنجاز إنتاج الهيدروجين المضاد عبر تلك السيرورات. كانت تجربة «أثينا» التي كان يشرف عليها الفيزيائي رولف لاندوRolf Landual في بداية سنة 2003، قد تجاوزت فرقة مشروع «أتراب» التي يشرف عليها جيرالد غابرييلزي، والتي نجحت قبل بضعة أسابيع، في إنتاج حوالي مائة مليون من ذرات الهيدروجين المضاد. فبالنظر إلى إنتاج 1996، الذي كان يتمثَّل في عشر ذرات من الهيدروجين المضاد، أدت آليات الإنتاج التي جربتها أثينا وأتراب لا فقط زيادة ملحوظة في عدد الجزيئات المنتجة، ولكنها أدت أيضاً إلى إنتاج ذرات من الهيدروجين المضاد من طاقة أضأل بكثير، ومن ثم أكثر انصياعاً للتحكم من الذرات التي أنتجها LEAR ذات الطاقة العليا. وفي الحين الذي كانت فيه مدة حياة الذرات المضادة لا يتجاوز بضعة مليارات من الثانية، صار من الممكن الحفاظ على جزء مهم من الذرات المنتجة في تجارب AD خلال وقت كاف (من بضع ثوان إلى بضع ساعات) للقيام بقياسات دقيقة تمكّن من تجريب التوازي بين المادة والمادة المضادة في ميدان جديد. لكن الذرات المنجزَة لدى أثينا وأتراب في التجارب التي تمت في AD، وبالرغم من أنها كانت «أبْرد» بكثير من الذرات

المنجزة سنة 1995، فهي لا زالت سريعة جداً كي يمكن اصطيادها في مستوى معقول في الأشْراك المغناطيسية التي يعرف الفيزيائيون بناءها ونصبها. وبما أن الذرات محايدة فإنها تتطلب تشكيلة تتضمن حقولاً مغناطيسية مهمة جداً كي يتم اصطيادها، وحصة الذرات المحتفظ بها تصل حدّ الصفر حين تتجاوز الحرارة التي يتم فيها إنتاجها بضع درجات.

وللتوصل إلى إنجاز قياسات للطيف الذري أو للجاذبية على ذرات الهيدروجين المضاد، من الضروري التوصل إلى خلقها في حرارة تكون أضأل ما يمكن. ذلك هو الهدف الذي ابتغته فرقة «أتراب»، من خلال مقترح قام به صاحب جائزة نوبل 2005 للفيزياء، ثيودور هانش Theodor Hänsch. ولإنتاج ذرات من الهيدروجين المضاد أكثر برودة من تلك التي أنتجتها أثينا وأتراب سنة 2003، فإن التقنية التي اقترحها هانش تتمثل في إنتاج أيون مكوّن من بروتون مضاد وبوزيترونيْن. ففي عالم مادتنا، يكون مرادف هذا الأيون مستقراً بالرغم من هشاشته ويتكون من بروتون وإلكترونيْن يدوران حوله. وما إن يتمّ صنع هذا الإيون، حتى يغدو من الممكن تبريده باعتبار أنه مشحون، وذلك بجعل الأيونات والمسالك الكهرُمغناطيسية ذات

الحرارة المنخفضة جداً في وضعية تماسّ كهرُمغناطيسي. وحين يتمّ تبريد هذا الإيون كي تسمح حرارته باصطياد الذرة أو بقياس الجاذبية، يتمّ استئصال أحد البوزيترونيْن بدفْع لايزر أفقي (لا يغير السرعة العمودية للأيون)، ونجد أنفسنا بحضرة هيدروجين مضاد يملك الآن سرعة ضعيفة كافية كي يمْكن استعماله. هذه الطريقة في الإنتاج يتمّ تدارُسها من لدن فرقتيْ أثينا وأتراب وفي مختبرات خارجية. وهي مع ذلك تتطلب مصادر هائلة من البوزيترونات لا يعرف العلماء لحدّ اليوم كيف يوفّرونها. وهكذا فقد تصور الفيزيائيون تقنيات جديدة للإنتاج، مستعملين مسرّعات صغيرة تكاد تكون محمولة يمكنها إنجاز مصادر للبوزيترونات أكثر حدّة من تلك التي تمَّ التمكُّن من إنجازها في ما قبل.

لكن من السذاجة أن نعتقد أننا يمكننا آجلاً الذهاب للتعبئة بالهيدروجين المضاد باعتباره محروقاً ذا حصيلة قصوى. فحسب الإيقاع الحالي للإنتاج، فإن لتراً من الهيدروجين المضاد، الذي يحتوي نسبة 10^{22} من الذرات، يتطلب عمر الكوْن كي يتم إنتاجه... بيد أن التزايد المُتسارع للمنجزات في مجال الإنتاج يسمح لنا بتصور قياس أولي للجاذبية على ذرات من الهيدروجين المضادّ

خلال البضع سنوات الآتية.

لِمَ تصْلح المادّة المضادّة؟

في انتظار تحقيق التقدم في إنتاج المادة المضادة، يطالب المجتمع المدني في الغالب من الفيزيائي إذا ما كان لأبحاثه في هذا الميدان من تطبيقات. ففي مجالات الفيزياء الأساسية كفيزياء الجزيْئات والفيزياء الفلكية، فإن الهمّ الأساس يتمثل اليوم في البحث عن فهم أفضل للكون. فبما أن التطبيقات تكون غالباً غير متوقّعة، فهي تظهر في ما بعد على ضوء المعرفة التي تنكشف فيها. وفي الوقت الذي قام فيه أينشتاين بأعماله الباطنيّة عن طاقة الكتلة (الصيغة الشهيرة $E = mc^2$)، من كان يتصور أنها ستؤدي في وقت ما إلى التحكم في استعمال الطاقة الذرية، ومن كان يتصور أن الخصائص الكوانتية الغريبة للإلكترونات في صندوق، التي درسها فيرْمي Fermi قد تكون ضرورية لفهم الموصِلات النّصفية؟

هل نحن نشهد الآن تطبيقات ناجمة عن الاشتغال على المادة المضادة؟ خلال الندوات الأخيرة التي تتناول فيزياء البروتون المضاد والهيدروجين المضاد (لأن الفيزيائيين لا يجسرون الآن على الحلم بذرات مضادة أكثر تعقداً)، تم

اقتراح العديد من التطبيقات يمكن لبعضها أن يرى النور في السنوات المقبلة.

ذلك هو الأمر مثلاً مع معالجة بعض أنواع السرطان بكومة البروتونات المضادة. والكثير من المعاهد، على سبيل التجريب، ثم على سبيل العلاج المعترف به، استعملت كومات البروتونات ذات الطاقة المنخفضة والمؤيْوَنة بشدة، للقضاء على الأوْرام السرطانية والسعي إلى منح الجسم سبْقاً حاسماً في صراعه ضد الخلايا الناشرة للمرض. وإحدى المشكلات الأساسية في هذا النوع من العلاج تعود إلى أننا لا نعرف خلال الإشعاع إذا ما كان ذلك الإشعاع يتم في المكان المرغوب فيه. فإذا ما تحرك المريض مثلاً ولو بشكل خفيف، لا ندرك ذلك لتوّنا، وهو ما قد يكون ذات نتائج وخيمة.

لكننا باستعمالنا تناوُبياً لكومة من كثافة ضعيفة من البروتونات المضادة، يمكننا أن نتوصل إلى التجاوب المباشر مع مشكلة كهذه. فما أن يتوقف البروتون المضاد، حتى يتم اصطياده من قبل نواة فينْدثر. هذا الاندثار ينتج عموماً العديد من الجزيْئات، ومن ضمنها بيادق يمكنها في الغالب الانفلات من جسم المريض. وبالتعرُّف على منتَجات الاندثار، يمكننا إعادة تشكيل المكان الذي

تركته، وبذلك يتم تحديد أن الورم وليس العضو المجاور هو الذي يتعرض للإشعاعات. ومن خلال المقدُرات الحديثة لعلاج المعطيات، من الممكن التجاوب في أقل من واحد من الألف في الثانية مع حركة المريض.

ثمّة تطبيقٌ آخر من هذا النوع، هو الكاميرا ذات البوزيترونات، التي تم اقتراحها وتطبيقها من سنوات قليلة على يد الفيزيائي الفرنسي الحائز على جائزة نوبل جورج شارباك Georges Charpak. هنا يتمّ حقن المريض بجرعة ضئيلة من مادة تتضمّن جسماً إشعاعياً يتفكَّك لينتج بوزيتْروناً. هذا البّوزيترون، أي الجزيْء من المادة المضادة في محيط من المادة، سوف يتفكك إلى فوتونيْن، لكل واحد منهما طاقة كتلة إلكترون، أي حوالي 0,5 MeV. فبالتعرف على هذين الفوتونيْن، من المْمكن تحديد موقع منطقة الجسم الذي تم فيه الإبطال. وباستعمال تلك المنتَجات التي تسمى «الواسمات»، بحيث يتم تثبيتها بفضل بعض الخلايا، يمكننا القيام بفحص بالأشعة، لكن بنسَب من الإشعاع أقلّ قوة ممّا في الفحص بالأشعة العادي، وبذلك نكشف بشكل مباشر تحولات المواد التي تغْنينا.

لكن إذا كنا نعرف في مجال الطب النووي مواد تبثّ بّوزيترونات، فإن إنتاج البوزيترونات المضادة، وهي

أثقل ألفي مرة، تتطلب استعمال المسرّعات المكْلفة الكبيرة الحجم. وقد جاءتهم فكرة خزْن البروتونات المضادة في قنّينات مغناطيسية قصد نقْلها وتسْليمها مثلاً لمستشفى لغايات علاجية بالأشعّة. في قنّينة كهذه، حيث يترك الفراغ في قيمة ضئيلة جداً بفضل الحرارة المنخفضة جداً للجدران التي «تصطاد» كل الذّرات الموجودة، تستطيع البروتونات المضادة من البقاء على قيْد الحياة بضعة شهور. وقد بلورت جامعة بنسيلفانيا نموذج شَرَك مكرَّس لهذا النوع من التطبيقات الطبّية. وحالياً من المْمكن خزْن عدة ملايين من هذه الشِّراك المغناطيسية، ويُتوقَّع في المستقبل بناء شِراك تمكّن من استقبال أكثر من عشرة مليارات من البروتونات المضادة.

إن مشكل خزْن كميات كبرى من المادة المضادة، في شكل ذرّات محايدة لتفادي مشكل النبّذ الكهْربائي بين الجزيْئات المضادة، صار يهمّ شركات الدفْع الفضائي الأمريكية والألمانية، وإن كان الأمر في مسْتوى من الدراسات أولياً. نحن لم نصل بعد عصر «ستار تريك» الذي تنطلق فيه السفينة الفضائية «أونتروبريز» (بسرعة تفوق سرعة الضوْء)، مدفوعة بمحرك نفّاث يشتغل بالمادة المضادّة. وإن كانت هذه الوسيلة في الدفع تظل في عداد

الخيال العلمي، فإن مشكل وزْن المحروقات، في حالة الرحلات الفضائية، أصبح حاسماً في الرحْلات الطويلة، بحيث إن المادة المضادة، بالرغم من كلْفتها الباهظة، يمكنُها أن تمثّل الحلّ باعتبار أن مرْدوديتها الطاقية قصوى. وبالرغم من أننا لا نزال على بعد عدة مئات من السنوات من تحقيق مثل هذه المشاريع، فإن باحثين من قبيل غريغ سميث Greg Smith من جامعة بنسيلفانيا، يكرسون وقتهم للطريقة التي بها يمكِن بناء دافع من المادة المضادة، بالرغم من أن إنجاز تلك الأبحاث بكمّيات ضئيلة من المادة المضادة، كتلك التي يمكننا اليوم صنعها، يبدو اليوم أمراً صعباً.

إضافة إلى ذلك، إذا ما نحن استطعنا صنع كميات من المادة المضادة تفوق الغرام الواحد، فينبغي التخوف من الحفاظ على هذه القطعة من المادة المضادة خارج كل تماسٍّ مع المادة العادية، ذلك أن الطاقة التي يحرّرها إبطال هذه القطعة الصغيرة من المادة المضادة مع كمية مشابهة من المادة، تمثل قوة قنبلة من حوالي 20 كيلوطناً من المتفجرات، أي ما يقارب قوة قنبلة هيروشيما. ثمة حلقة من مسلسل الخيال العلمي «ستار تريك» يتم فيها «انتحار» السفينة الفضائية «أنتروبريز» قصد تدمير العدو

الذي كان قد اكتسَحها. وإذا نحن عدنا إلى رفْع الغرام من المادة المضادة، فإن المختبر الأمريكي JPL (مختبر دفع الطيارات) قد برهن على إمكان الحفاظ على شيء صغير من قيمة غرام بتحويله كهربائياً (وبما أن لا مجال للمْسه، يتم استعمال اللايزر لاستخلاص الشُّحْنات) وذلك بتثبيت تلك الكتلة الصغيرة بواسطة حقل كهْربائي. ولا يبقى سوى أن نأمل أن يتم تطْبيق نظام الرفع هذا على غرام مادّتنا المضادة، بحيث لا شيء يمكن أن يضع حدّاً بشكل سابقٍ لأوانه للسفينة الفضائية ومَن بها، لا خطأ في البرمجة ولا نقص في التعبئة.

الأمل في تحوُّل كامل في الطّاقة

وكما نرى، فليس لنا اليوم إلا بضع أفكار حول أنواع الاستعمال المستقبلي الذي يمكن القيام به للمادة المضادة. فالتطبيقات القليلة التي أشرنا إليها سوف تُعتبر بالتأكيد متجاوَزة أي غير واقعية كلية في السنوات المقبلة. لكن قد تكون الوضعية مشابهة لوضعية المسرّعات الآلية للجزيئات التي تنتج، كما أشرنا إلى ذلك، المادة والمادة المضادة، والتي كنا نعتقد حتى وقت قريب أنها ليست ضرورية إلا في البحث الأساسي.

لقد درست العديد من فرق الفيزيائيين، ومن بينهم كارلو روبيا الحائز على جائزة نوبل، في السنوات الأخيرة، إمكانية إنجاز مولّدات للطاقة الذرية تكون موثوقاً بها في اشتغالها (باعتبار أن المحركات الذرية تتوقف فوراً عند قطْع كومة الجزيئات) وغير قابلة للاستعمال لأغراض عسكرية[17]. هذا النمط من الاشتغال يسمح باستعمال المخزونات الهائلة الطبيعية من الثوريوم، وهو عنصر قابل للانشطار موجود على الأرض بكميات أكبر من كميات الأورانيوم، ومن ثم ضمان آلاف من السنوات من الطمأنينة الطاقية للبشرية.

وبالعودة إلى المادة المضادة، فإن إعلان المختبر الأوروبي لفيزياء الجزيئات، عن استعمال AD (مبطئ البروتونات المضادة)، قد أفرز بضعة استكشافات جسورة تتعلق بالاستعمالات النهائية الممكنة التي تسمح بها المادة المضادة. لنذكّر أن محروقاً ذرياً كلاسيكياً إذا كان لا يحوّل سوى جزءٍ صغير من كتلته الطاقية، فإن الحصيلة من إنتاج الطاقة لحظة اللقاء بين المادة المضادة والمادة تكون من درجة قصوى لأن التحويل إلى طاقة يكون تاماً. إن الإنتاج المباشر للمادة المضادة لا يبدو اليوم أمراً واقعياً، للأسباب التي ذكرنا في فصل «صنع المادة المضادة».

لكن، إذا كان هدفنا هو صنع الطاقة بأكثر شكل فعال ممكن، فسيكون أكثر مردودية، من خلال إطلاق أحد آليات التحول التي رأينا أنها تسمح للمادة بالتحول إلى مادة مضادة، لا بالسعي إلى الإنتاج المباشر للمادة المضادة.

وكما أشرنا إلى ذلك، في الفصل عن «طرق التحول بين المادة والمادة المضادة»، فإن أولى تلك الأبواب تتمثل في توحيد القوى الأساسية. وللأسف، فإن هذا التحول يبدو أنه يتطلب المرور من شكل بالغ الكلفة في الطاقة (مثلاً، البوزونات الرسولة X و Y في التوحيد الكبير)، يبطئ بشكل كبير عملية التفكك (وهو أمر مستحبٌّ لبقائنا على قيد الحياة). وهكذا فإن الآلية التي تصوَّرها الفيزيائي الروسي فاليري روباكوف، والذي يستعمل الاحتكار المغناطيسي لتحفيز المرور بطريقة خارقة بين المادة والمادة المضادة وتسريعه، يجد طابعه النافع كاملاً، ذلك أننا رأينا أن كتلةً ولو كانت مختزلة في بضعة غرامات من الاحتكارات المغناطيسية يمكنها أن تغذي بالكهرباء والتسخين مدينة متوسطة الحجم. إن الميزة الكبرى لهذا المحفّز تتمثل في أنه لا يتأثر خلال توليد التحفيز، ومن ثم يمكن استعماله بشكل لانهائي.

الهوامش

1- لكي نفهم تضعيف عدد الحلول بالعلاقة مع المعادلة غير النسبية لشرودنغر، يمكننا الإحالة إلى العلاقة بين الطاقة والكتلة والدفْع النسبية لجزيْء معيَّن. وبما أن هذه العلاقة تبرز مربَّعاً، فإن كل حل للطاقة الإيجابية يغدو مرتبطاً بحل للطاقة السلبية. وحين نترجم ذلك إلى معادلة ذبذبات، فالأمر يتعلق بمعادلة كلين-غوردون *Klein-Gordon*، نسبة إلى العالمين الفيزيائييْن اللذين بلوراها. لكن معادلة ديراك أشد تعقداً، لأنها تدخل أيضاً «السْبّين»، وهو نوع من حركة الدّوران الداخلي للجزيْء، مما يضعِّف مجدّداً من الحلول.

2- يتطلب إنجاز تجربة بين الجزيئات والجزيئات المضادة شروط حياة قصوى، وذلك لتفادي الإبطال السابق لأوانه بين الجزيئات والغاز الرسوبي. انظر في هذا الكتاب، الفصل المتعلق بالتحكم في المادة المضادة واستعمالها.

3- لقد قدم الفيزيائي فرانز كلينخامر *Frans Klinkhamer*، من جامعة كارلسروه، سنة 2000 مثالاً واضحاً لخرق التوازي *CPT*. وهذه الآلية للخرْق تتطلب كوْناً من هندسة غير مبتذلة، «ينغلق على نفسه»، أي هندسة تحيل على الفضاءات المنْحنية المرتبطة بالجاذبية.

4- يشير روبرت والد وتوم بانكس إلى براهين مشابهة لبراهين فرانز كلينخامر، المثبتة أعلاه. ففي فضاء منحنٍ، يصعب علينا «الإغلاق الفعلي» للنظام، والتحديد الدقيق للمادة بالعلاقة مع المادة المضادة.

5- هذا البرهان ليس حدْسياً، بحيث لم يتم اكتشافه إلا بعد سنين عديدة. وهو يقوم على أعمال الفيزيائيين نيكولا كابيبو *Nicola Cabibbo* وماكوتو كوباياشي *Makoto Kobayashi* وتوشيهيدي ماسكاوا *Toshihide Maskawa*، الذين وصفوا الصوْرنة التي تتحكم في التفكك بين أسر الكواركات. وفي هذه الصّوْرنة، يوجد معيار واحد يبيح خرق التوازي بين المادة والمادة المضادة بخصوص ثلاث أسر من الكواركات، في الحين الذي يكون فيه ذلك مستحيلاً بأسرتين فقط.

6- إن الفهم الدقيق لتبرير كون مجموع شحنات الإلكترون والبروتون محايدة بدقة ليس أمراً بدهياً. فهو يقوم على نظرية المجموعات، في العلاقات التي تربط شحنات الكواركات بشحنات اللبْتونات. والخطاطة الصحيحة للتوازي لا زالت لم تُعرف لحدّ اليوم، بالرغم من أن مفهوم التوحيد مقبول عموماً.

7- بدقة أكبر، ولو قبلنا جدلاً بأن نيل أرميسترونغ يسعى إلى أن تطأ قدماه قمراً مكوناً من المادة المضادة، فمن المحتمل أن يتم الرمي به بعنف من الوهلة الأولى، وهو ما لن يهلك

معه رائد الفضاء كلية، كما أن رجله لن تنتج فوهة بركان قطرها من عدة كيلومترات.

8- بصورة أدق، تكون طاقة كتلة بروتون حوالي 0,9383 GeV، أما طاقة كتلة نوترون فهي حوالي 0,9396 GeV. أما الإلكترون، فهو 1836 أخفّ وزناً من البروتون، وليس له من طاقة كتلة سوى حوالي 0,511 MeV.

9- في الحقيقة، ليس البروتون هو الذي يتفكّك عموماً، لكن مثلاً في الصيغة الأبْسط، كواركان ينصهران لإنتاج كوارك مضاد ولبتون (الشكل 11).

10- بعبارات تقنية، القصور الحراري والحرارة هما في الدينامية الحرارية قيم مصرَّفة. عكس الحرارة يعبر عن نفسه باعتباره تنويعاً على القصور الحراري حين نقوم بتنويع للطاقة الداخلية لنظام ما، بحيث تكون كل المعايير الخارجية، كالحجم، قد تم الحفاظ عليها ثابتة.

11- ثمة تدقيق يفرض نفسه: نحن نعرف أن التوازي T يتم خرقه بطريقة ضعيفة (حوالي 6 بالمائة) لكن واقعية، في بعض التفاعلات تدخل فيها الكاوونات المحايدة، وربما أيضاً في حال الميزونات B.

12- للتبسيط نقول بأن تحولا أحادياً يحافظ على الاحتمالية خلال التطور، باحتمال 100 بالمائة (وحدة) حين نجمع مجمل البدائل.

13- يمكننا أن نجد هذا الخطاب في: http://nobelprize.org/physics/laureates/1965/feynman-lecture.html

14- يهتم الفيزيائيون في هذه القياسات بما يُسمى «مسافة اللمعان»، المرتبطة بدفق الضوء الذي يتم تلقّيه من شيء ومن لمعانه المطلق.

15- ثمّة مع ذلك عدد من الفيزيائيين يسعون إلى التشكيك في هذا الاعتقاد.

16- أفضل الفراغات يتم تحقيقها بتوليد الحرارة المنخفضة، بجدران أوعية تكون ببضع درجات كلفين. ففي درجات الحرارة هذه، تكون الجزيئات، وفي أول اصطدام بالجدار البارد، تجد نفسها في شرَك في السطح. وهكذا، تم الحفاظ على جزيئات مضادة لمدة شهور عديدة.

17- مسلك الثوريوم هذا، الذي مكّن من فترة طويلة من إنتاج الطاقة، ليس بعد أمراً راهناً. فتفكيك قسم كبير من الأسلحة النووية للكتلة السوفياتية قد أدى إلى انخفاض مؤقت في كلفة اليورانيوم والبلوتونيوم المطوّريْن. ولن يتم تشغيل مسلك الثوريوم إلا بعد إنشاء المولدات الجبارة، التي ستفرض نفسها في العقود المقبلة بعد نفاد الموارد من اليورانيوم.

ثبت بالمراجع

Martin Gardner, *L'Univers ambidextre*, Le Seuil, collection «Points Science», 2000.

Robert L. Forward, Joel Davies, *Mirror Matter: Pioneering Antimatter Physics*, Backinprint.com, 2001.

Kip Thorne, *Trous noirs et distorsions du temps : l'héritage sulfureux d'Einstein*, Flammarion, collection «Champs», 2001.

Philip J.E. Peebles, *Principles of Physical Cosmology*, Princeton University Press, 1993.

James Rich, *Principes de la cosmologie*, Éditions de l'École polytechnique, 2002.

Jean-Philippe Uzan, Patrick Peter, *Cosmologie primordiale*, Belin, collection «Échelles», 2005.

William Kaufmann, *Black Holes and Warped Spacetime*, Bantam Books, 1980.

Jean-Pierre Luminet, *Les Trous noirs*, Le Seuil, collection «Points Sciences», 1992.

Stephen Hawking, *Une brève histoire du temps : du big-bang aux trous noirs*, J'ai Lu, 2000.

Maurice Jacob, *Au coeur de la matière*, Odile Jacob, collection «Sciences», 2001.

Gordon Fraser, Antimatter: The ultimate mirror, Cambridge University Press, 2002.

Jean-Pierre Baton et Gilles Cohen-Tannoudji, «L'horizon des particules : complexité et élémentarité» dans *L'Univers quantique*, Gallimard, collection «NRF Essais», 1989.

Gilles Cohen-Tannoudji et Michel Spiro, *La Matière-espace-temps : la logique des particules élémentaires*, Gallimard, collection «Folio», 1990.

Michel Crozon, *La Matière première*, Le Seuil, 1987.

Paul Davies, *La Nouvelle Physique*, Flammarion, 1993.

Trinh Xuan Thuan, *La Mélodie secrète*, Gallimard, collection «Folio», 1991.

Steven Weinberg, *Les Trois Premières Minutes de l'Univers*, Le Seuil, collection «Points Science», 1988.

Robert Forward, et Joel Davis, *Les Mystères de l'antimatière*, Rocher, collection «L'Esprit et la Matière», 1991.

Abdus Salam, Werner Heisenberg, et Paul A.M. DIRAC, *La Grande Unification*, Le Seuil, 1991.

Steven Weinberg, *Le Monde des particules, de l'électron aux quarks,* Belin, collection «L'Univers des sciences», 1985

معجم المصطلحات

البيغ بانغ (الانفجار العظيم): صار من المعروف اليوم أن الكون عرف شباباً كانت فيه كثافته أكبر مما نقوم بقياسه اليوم. بل إن نظرية النسبية تقول بأن هذه الكثافة كانت لانهائية في الأصول الأولى للفضاء، وهذه البداية الفريدة هي ما يسمى البيغ بانغ.

الالكترونات: هي أخف اللبتونات المشحونة كهربائياً. والإلكترون ذو شحنة مضادة لشحنة البروتون، وهو يمكّن المادة العادية من أن تنتظم في نوترونات. وحسب ما نعرف، فهو أولي أي لا بنية تحتية له.

الفضاء-الزمن: إذا ما كان يبدو من الطبيعي وصف محيطنا باعتباره فضاء ذا ثلاثة أبعاد، فإن نظرية النسبية تعلمنا أن الإطار الذي يحدد بشكل كامل معطيات حدث ما هو الفضاء-الزمن ذو الأربعة أبعاد، أي ثلاثة أبعاد للفضاء وبعد للزمن.

الجاذبية: كان نيوتن هو أول من صاغ صورياً قوانين الجاذبية الكونية بين الأجسام، ووصف بنجاح حركات الكواكب تبعاً لقوى الجاذبية الكونية.

ونحن نصف اليوم الجاذبية منحنى للفضاء-الزمن، بفضل نظرية النسبية العامة لأينشتاين.

عدم استقرار الفراغ: حسب الميكانيكا الكوانتية، ليس للفراغ من فراغ غير الاسم، ويمكن أن يعتبر كوسط حيث أزواج افتراضية من الجزيء والجزيء المضاد تسعى باستمرار للوصول إلى الحياة وتكون واقعية. وبوجود حقل كهربائي أو للجاذبية، فإن هذا الوصول إلى الحياة يغدو أحياناً ممكناً، مثلاً في حال تبخر الثقوب السوداء. وهكذا نتحدث بلغة تقريبية عن «عدم استقرار» الفراغ.

التفاعلات: توصف اليوم مجموع التفاعلات بين مكونات المادة من خلال تفاعلات أربعة: التفاعل الكهرمغناطيسي، المألوف لدينا؛ التفاعل الضعيف، الذي يتحكم بالأخص في بعض التفككات في الأنوية؛ التفاعل القوي، الذي يصف التقوى بين الكواركات في النيوكلونات، وأخيراً التفاعل بالجاذبية التي يذكرنا بها دوماً ثقل جسمنا. نحن نعلم أن التفاعلين الضعيف والكهرمغناطيسي ليسا في الواقع سوى وجهين لتفاعل كهربائي ضعيف، وأن التفاعل في طاقة قوية يلتحق بالضرورة

بالتفاعلين السابقين. وتغدو الجاذبية أكثر إلغازاً ولم يتم التوصل لحد الآن إلى توحيدها بشكل مقنع مع التفاعلات الأخرى.

الكاوون: ينتمي إلى أسرة الميزونات، وهو يتشكل من كوارك وكوارك مضاد. في حالة الكاوون، ينتمي أحد الكواركات إلى الأسرة الأولى والثاني إلى الثانية. من ثمَّ، تكون حياته قصيرة، ولو كان التفاعل الضعيف يمكّنه من البقاء على قيد الحياة بعض المليارديات من الثانية. وبفضل دراسة تفككات الكاوونات تمت البرهنة على خروق المساواة P والتوازي CP.

اللبتونات: كما هو الأمر مع الكواركات، تتجمع اللبتونات في ثلاث أسر. وفي كل أسرة نجد جزيئاً مشحوناً كهربائياً (الإلكترون في الأسرة الأخف) وجزيْء محايد وبكتلة نعرف عنها الآن أنها ليست محايدة وإنما ضعيفة جداً هو النوترينو. يخضع هذان الجزيئان للتفاعل الضعيف وأما السبب وراء وجود ثلاث أسر فلا يزال لغزاً.

قوانين المحافظة: هذه القوانين التي تبدو مترابطة عموماً مع توازيات تحترمها الطبيعة، تمكّن من بناء كميات

كالطاقة والشحنة والدفع، التي يتم الحفاظ عليها في أنظمة معزولة.

الكتلة الجاذبية: قوة ضرورية للحفاظ على جسم ما جامداً في حقل الجاذبية. وتشير التجربة المعتادة إلى أن الجاذبية تكون غالباً جاذبة والكتل الجاذبية إيجابية، بيد أن النظرية لا تمنع أن تمارس بعض الأجسام قوى جاذبية نابذة وأن تكون لها كتلة جاذبية سلبية. بالمقارنة مع ذلك، فإن الكتلة الجامدة تصف قوة المقامة التي يمارسها جسم حين يتم إخضاعه لتسريع واحد. والصيغة الشهيرة E = mc2 تعني أيضاً أن الطاقة الضرورية لإنتاج جسم ما تكون ملائمة لكتلته الجامدة.

الميكانيكا الكلاسيكية: بلورها نيوتن، وهي تصف حركة الأجسام حسب القوى التي تمارسها تجاه بعضها بعضاً. وهي على عكس الميكانيكا الكوانتية تمنح لكل شيء وضعية وسرعة محدَّدين. وتفترض صلاحية الميكانيكا الكلاسيكية، التي لا تعرف سرعة قصوى، بالإضافة إلى ذلك، أن السرعات يلزم أن تكون ضعيفة أمام سرعة الضوء.

الميكانيكا الكوانتية: تبلورت في بداية القرن العشرين،

وهي تعترف أنه من المستحيل الحديث بتزامن عن وضعية سرعة جسم معين بدقة لامتناهية. ونحن نلج مجال الميكانيكا الكوانتية حين يصير الفعل، باعتباره نتاجاً للدفع بالمسافة، من قبيل ثابت بلانك هـ.

الميزون π (أو البيدق): الميزون π هو تجميع لكوارك ولكوارك مضاد من الأسرة الأولى. وكتلته ضعيفة، أي حوالي سُبُع كتلة بروتون أو نوترون، وهو من ثمّ يخضع للإنتاج الدقيق في الفاصل بين الجزيئات.

النوترينو: هو لبتون ذو شحنة محايدة. وهو لا يتفاعل إلا بتفاعل ضعيف، وهو ما يفسر مثلاً أن نوترينوا آتياً من قلب الشمس لا يملك إلا حظاً على مليار كي يتفاعل مع الأرض حين يعبرها. وكما هو الحال مع الكواركات، توجد ثلاث أسر من النوترينوات تتوفر على كتلة ضعيفة جداً أو محايدة.

النوترونات: تتشكل كما البروتون من تجمع ثلاثة كواركات من الأسرة الأولى. وحين يكون النوترون حراً، يتطلب تفككه إلى بروتون وإلكترون ونونترينو مضاد خمس عشرة دقيقة. والنوترون كما يدل على ذلك اسمه، محايد كهربائياً.

العدد البريوني: هذا العدد ضرب من «شحنة المادة»، شبيه إلى حد ما بالشحنة الكهربائية. وجدواه تأتي من كون المادة الذرية تكون في القاعدة العامة بالغة الاستقرار. وغالباً ما ننسب شحنة بايرونية من وحْدة للبروتون والنوترون، وشحنة -1 للبروتون المضاد وللتنوترون المضاد. والجزيئات التي لا تتضمن كواركات، أو عدداً مشابها من الكواركات والكواركات المضادة، لها عدد بايروني محايد.

العدد اللبتوني: ينبني هذا العدد بشكل مشابه للعدد البايروني، لكن هذه المرة للبتونات. وهكذا ننسب «شحنة» لبتونية من وحْدة للإلكترون ولنترونه، ووحدة -1 لجزيئاتهما المضادة أي البوزيترون والنوترينو المضاد. ويبدو هذا العدد اللبتوني محفوظاً، مثله مثل العدد البايروني، إلا في الطاقة العالية جداً.

الفوتونات: إنها رسل التفاعل المغناطيسي، وبما أن كتلة الفوتون تقريباً محايدة، فإن مدى التفاعل الإلكترمغناطيسي يكون من ثم لامتناهياً. وحين تكون له طاقة من نسبة الإلكترونفولت (eV)، يكون الفوتون مرئياً بالعين المجردة. وطاقته التي

تكون متناسبة مع مداه، تستكشف كل أنواع الطاقة.

البوزيترونات: تم اكتشافها سنة 1932 على يد كارل أندرسون Carl Anderson. والبوزيترون هو الجزيْء المضاد المرتبط بالإلكترون. وبما أن شحنته معارضة لهذا الأخير، فهو يملك الكتلة التي له. وهو ينتفي مع الإلكترون ببث فوتوني غاما أو أكثر.

البروتون: هو نواة خفيفة للهيدروجين الخفيف، ويتكون من تجمع ثلاثة كواركات من الأسر الأولى، ويملك شحنة كهربائية مناقضة لشحنة الإلكترون. وبما أن الكواركات الأخفّ لا أسرة لها، فإن الإلكترون يكون بالغ الاستقرار، بالرغم من أننا نشك في أنه أيضاً يتفكك بوتيرة ضعيفة جداً. الكواركات: هي كما اللبتونات تتجمع في ثلاث أسر. وكل أسرة تتضمن كواركين. تشكل كواركاً الأسرة الأولى قلب النوكليونات، والبروتون والنوترون. وترتبط الكواركات في ما بينها بواسطة الغليونات (اللواصق)، وذلك بشكل بالغ القوة في حرارة ضعيفة بحيث لا تظهر الكواركات معزولة وإنما دوماً في شكل تجمّع. وهكذا فإن البروتون

والنوترون يتشكلان من ثلاثة كواركات، والميزون π من من كوارك وكوارك مضاد.

الأشعة الكونية: هكذا تسمى الجزيئات المترحّلة في الفضاء الموجود بين الكواكب والنجوم. وهي تنسحق على الأرض باستمرار في الفرشات العليا من الجوّ. يتعلق الأمر أساساً بإلكترونات وبوزيترونات وبروتونات ونُوى. وهذه الأشعة الكونية من شأنها أن تتسارع حتى تغدو طاقات هائلة لعدة «جولات» طاقية في الجزيْء.

الأشعة غاما: هو الاسم الذي يمنح للفوتونات التي تملك طاقة بنسبة فيغاإلكترونفولت (MeV) أو أكثر. ونحن نرصدها مثلاً في بعض التفاعلات الذرية كما في التناحر بين المادة والمادة المضادة.

النسبية: تعود نظرية النسبية الخاصة إلى ألبرت أينشتاين الذي بلورها في بداية القرن العشرين. وهي قد برهنت على أن مفاهيم الزمن والفضاء كانت مرتبطة ارتباطاً وثيقاً بملاحظ راصد. لكن يمكننا بناء فضاء-زمن انطلاقاً من الإشارات الضوئية وسرعة الضوء التي يقيسها كل الملاحظين على أنها متساوية. وقد بلور أينشتاين في ما بعد نظرية

النسبية العامة التي هي النظرية النسبية للجاذبية. لكن وبالرغم من الجهود المبذولة في هذا الاتجاه، فإن الزواج بين الميكانيكا الكوانتية والنسبية العامة ينتظر دوماً تحقيقه.

السيبيرنوفا: تمر النجوم بمراحل عدة في الاحتراق الذري بمقدار ما تقوم بإحراق عناصر أثقل تم صنعها في المراحل السابقة. وبخصوص نجم هائل، فإن هذا الاحتراق لا يعود يتحمل ثقله الخاص. وهكذا فإن النجم ينهي وجوده كسيبيرنوفا، في انهيار كارثي يكون فيه للنجم، خلال فترة قصيرة، بريقاً يكون مساوياً لبريق مجرَّة.

ثقب الدودة: تبدو هذه المسارات القصيرة في الفضاء-الزمن في نظرية النسبية العامة ما إن نقبل بالكتل السلبية. وبما أنها يمكن أن تسمح بالسفر بسرعة أكبر من سرعة الضوء وبصعود الزمن، فهي بالتأكيد تخضع للحذف من قِبل الطبيعة في المستويات الماكروسكوبية، غير أنها تلعب مع ذلك دوراً مهماً في فهم الجاذبية.

الثقب الأسود: يعيِّن هذا المصطلح جسماً يكون من الكثافة بحيث لا ينفلت منه حتى الضوء. ونحن نعتقد

بوجاهة أن النجوم الهائلة تنهي حياتها أحياناً في شكل ثقوب سوداء. وتبرهن الميكانيكا الكوانتية أن الثقوب السوداء ليست سوداء كلية، وهي تبث عموماً وبشكل ضعيف إشعاعاً حرارياً.

نبذة عن المؤلف:

غابرييل شاردان Gabriel Chardin عالم فيزيائي فرنسي، عمل في شعبة الفيزياء الفلكية وفيزياء الجزيئات والفيزياء النووية في مركز الدراسات الفيزيائية الفلكية بساكلاي جنوب باريس. وقد أسهم في بلورة العديد من التجارب الدقيقة. في سنة 2007 حاز على الميدالية الفضية للمركز الوطني للبحث العلمي بباريس. وهو أحد المتخصصين الدوليين في المادة المضادة.

نبذة عن المترجم:

د. فريد الزاهي من مواليد 1960 بالمغرب. درس الفلسفة وحاز على دكتوراة السلك الثالث من جامعة السوربون وعلى الدكتوراة في الآداب. أصدر العديد من المؤلفات باللغتين العربية والفرنسية عن الصورة والجسد والمقدس. كما ترجم للعديد من المفكرين الفرنسيين والمغاربيين من أمثال: جاك دريدا وريجيس دوبري ومشيل مافيزيولي والخطيبي. حاز على جائزة المغرب للترجمة (2008)، وعلى جائزة البحث التشكيلي بالشارقة (2009). يشتغل حالياً مديراً للمعهد الجامعي للبحث العلمي بالرباط.

المادة المضادة.. المادة التي تسترجع الزمن

لو أن عالماً من المادة لقي عالماً آخر من المادة المضادة، فإننا سوف نشهد انفجاراً ذا عنف لا يوصف. لكن ما هي المادة المضادة؟ إنها تبدو في النظرية الكوانتية باعتبارها مادة «مرآة» تبعاً لتحولات الفضاء والشحنة أو لتحولات الزمن. لكن، لماذا سعت الطبيعة إلى خلق عالمٍ مرآةٍ يتألق اليوم بغيابه؟ هل يحتوي الكون على المادة قدْر المادة المضادة؟ أين توارت كل المادة المضادة التي كانت موجودة منذ فجْر الكون؟ لمحاولة الإجابة على هذه الأسئلة يفسر الكتاب ظهور مفهوم المادة المضادة في غمرة اكتشاف بنية الجزيئات. ومن خلال رسم تاريخ الكون وشبابه الصاخب، يسعى إلى فهم الدور الذي استطاعت المادة المضادة أن تلعبه. ثم يسير بعد ذلك إلى استكشاف عوالم المادة المضادة، منطلقاً من النظام الشمسي ليصْعد نحو المجرّات والبنيات الكبرى للكون.